



TAGEN FOREFRONT 10

多元研

KIRISHIMA, Akira

OKAMOTO, Satoshi

NANGO, Eriko

YONEKURA, Koji

YAMADA, Takahiro

YASHIRO, Wataru

NISHIBORI, Maiko



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 燃料デブリをはじめとした
放射性廃棄物のバックエンド工学

桐島 陽 教授

05

02 情報爆発、脱炭素という社会課題に
最先端の磁性材料研究のアプローチで挑む

岡本 聡 教授

11

03 タンパク質の機能メカニズムの解明に
革新的なブレークスルー

南後 恵理子 教授

17

04 「クライオ電子顕微鏡」による先端計測
生体超分子や有機化合物の詳細な立体構造に迫る

米倉 功治 教授

23

05 活性金属の可能性を探求し、
材料科学の未来を切り拓く

山田 高広 教授

29

06 誰も見たことのないミリ秒の4D世界を
世界最速のX線CT技術で〈見る〉

矢代 航 教授

35

07 放射光計測を駆使し
材料科学の未知の世界へ

西堀 麻衣子 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21年が過ぎました。従来の学問の区別や枠に捉われず、多様な物質・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み、あらゆる“もの”を多元的に研究することを目指して2001年4月に発足しました。物事を多元的(多面的)に捉えることの重要性は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。2018年4月には、それが新たに「金属資源プロセス研究センター」として誕生し、同時に「非鉄金属製錬環境科学研究部門」が設置されました。そして、2019年11月に「放射光次世代計測科学連携研究部門」、2020年5月に「製鉄プロセス高度解析技術(JFEスチール)共同研究部門」、8月に「次世代電子顕微鏡技術共同研究部門」の設置というように、長年の学術研究の蓄積を基盤とした産学連携へと大きく発展しております。こうして多元研では、資源から最先端素材までの社会循環を支える「プロセス科学」、無機・有機・バイオなどあらゆる物質を含む「物質科学」、そして、ナノからマクロまでのマルチスケールでの評価を実現する「計測科学」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。

所内だけでなく、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」や、青葉山キャンパスに建設中の次世代放射光施設(ナノテラス)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運営の一翼を担っています。また、次世代放射光と連携する東北大学の材料科学・計測科学の充実を図るため、令和3年度に学内複数部局の研究者の連携によるソフトマテリアル研究拠点を立上げ、令和4年度からは学際研究重点拠点として活動を始めております。日々刻々と成長し変化してゆく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。

あの忘れることのできない2011年3月11日の東日本大震災から11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宜しくお願いいたします。



FOREFRONT REVIEW



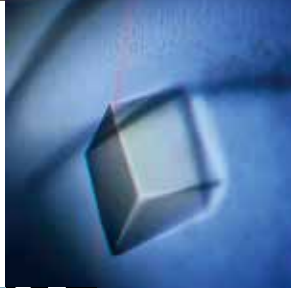
01



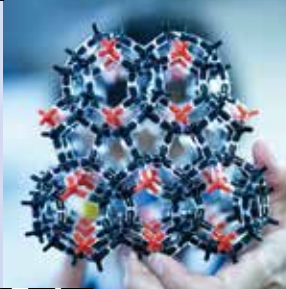
02



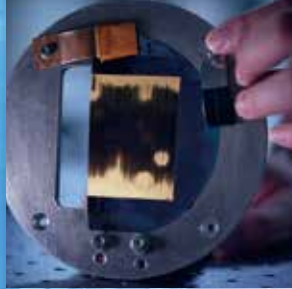
04



03



05



06



07

A man in a white lab coat is working in a laboratory. He is wearing white gloves and is focused on a piece of equipment. The background shows various pipes and machinery, suggesting a complex industrial or research environment.

FOREFRONT REVIEW

2011年に発生した福島第一原子力発電所の原子力事故。原子炉の中には毒性が高く複雑なアクチノイド元素などが含まれる膨大な量の燃料デブリが残されており、その処理プロセスが大きな課題となっています。桐島研究室では燃料デブリの物理・化学特性の把握や汚染水へのアクチノイドの溶出挙動研究、汚染物の安定化および廃棄体化法の開発を行い、福島第一原発の廃止措置や放射性廃棄物の処分実現に貢献することを目指しています。



燃料デブリをはじめとした 放射性廃棄物のバックエンド工学

アクチニウムやウラン、プルトニウムなどを含む元素群・アクチノイドは、全て放射性物質であるため取り扱える量や場所に制限があり、また酸化状態が変わると化学挙動も変化することから、基礎的な物理化学特性や熱力学データは未整備の状態が続いてきました。「私がアクチノイドの基礎研究に没頭するようになったきっかけは、学生時代、光吸収・発光スペクトルを測定していて、ある状態のウランが水溶液中で発光していることに気が付いたときでした。当時は発光しないものと考えられていた化学状態なので、光を吸収させると蛍光を発するというのが驚きでしたね。さっそく下手な英語で論文に書いて発表したところカルフォルニア大学バークレー校の先生の目に留まり、米国化学会に招待され講演を行うことになりました。最終的にその成果は、当時改訂作業が進んでいた『The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements*』というこの分野を代表する教科書に記載されました」。地道な実験を積み重ねてきた一学生にとって、これ以上ない刺激になったことは言うまでもありません。やがて基礎研究だけではなく、そこで得た知見を社会に生かすことはできないかと考えるようになりました。

注目したのが、原子力発電所で使用した燃料などの放射性廃棄物です。「原発のゴミが残りに残っていると、原子力は決して“持続可能なエネルギー”とは言えなくなってしまいます。そこで地層処分を進めるわけですが、人間が作ったバリアの耐久年数はどれくらいか、バリアが壊れたとき放射性物質は地表にどんな影響や危険を及ぼすのか、といった懸念が出てきます。そうした不安を少しでも拭うことはできないか、と考えました」。

そういった研究を黙々と続けているさなかに、東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所の事故が起きました。「本当にショックでした」と当時を振り返る桐島教授は、研究成果を通して市民に伝えてきた原子力の安全性が覆され、茫然自失になった時期もあると言います。しかし放射化学の専門家として、また福島の隣県であり東北を代表する大学の研究所の一員として向き合わなければならない問題でもあります。教授として一研究室を率いることになった桐島教授は、燃料デブリを重要な研究テーマに位置付けました。

多元物質科学研究所
金属資源プロセス研究センター
エネルギー資源プロセス研究分野 教授

桐島 陽

KIRISHIMA, Akira

1976年生まれ。神奈川県出身。東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻博士課程 修了。2002年日本原子力研究所(現・日本原子力研究開発機構)博士研究員、2005年東北大学多元物質科学研究所助手・助教、2007年フロリダ州立大学化学部博士研究員、2013年東北大学多元物質科学研究所准教授、2019年同教授。所属団体/日本放射化学会(2022年6月まで理事)、日本原子力学会、原子力規制委員会核燃料安全専門審査会審査委員、原子力発電環境整備機構(NUMO)技術アドバイザー委員会委員、原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF)廃棄物対策専門委員会委員。受賞/日本放射化学会 奨励賞、平成15年度 東北大学大学院工学研究科長賞、Migration '03 POSTER AWARD

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

* The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements (3rd ed.),
Editors:Lester R. Morss, Norman M. Edelstein, Jean Fuger, Springer, 2006

福島第一原子力発電所の燃料デブリ 模擬体を作って処理技術を検討

事故当時の炉内を想定し 模擬デブリを作製

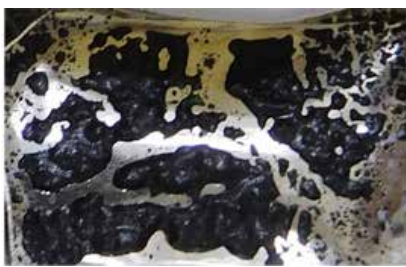
2011年に発生した東京電力福島第一原子力発電所(以下、福島第一原発)の事故の影響は、今もなお多くの課題を私たちに突きつけています。その一つが、膨大な量に及ぶ放射性廃棄物の処理問題です。福島第一原発の放射性廃棄物には汚染土壌といった比較的取り扱いが容易なものから、原子炉内に取り残されている燃料デブリといった性状や汚染

の程度が現時点では不明で取り扱いが困難なものまで幅広く含まれます。特に桐島教授たちが着目した燃料デブリは非常に高い放射線量と発熱量を持つため、取り出し作業を進めるにあたってできるだけ化学的な性質を理解・把握しておく必要があります。「事故当時の炉内を想定し、二酸化ウランをはじめとする核燃料や原子炉内の構造物の材料などを原料とした混合物を高温の電気炉で加熱処理し、模擬デブリを作製。その結晶構造

や化学的な安定性の評価を行ってきました」。原料の組み合わせや加熱時間、合成中の酸素濃度などの条件を変えながら作製した模擬デブリは、これまでに合計37種類にのぼると言います。

「固溶体化」が燃料デブリの 化学的性質を決めるカギに

現在、福島第一原発では、燃料デブリの取り出し準備のために格納容器内部にロボットや各種センサーを投入しています。桐島教授によれば、「機材に付着したウランなどの放射性物質を含む粒子は微量のため詳細な化学分析は難しいものの、電子顕微鏡での解析によって実験室で作製した模擬デブリとある程度似た構造を持つ」ことが分かってきているとのこと。合成した模擬デブリは炉内から取り出



作製した模擬デブリの一例。加熱前は粉末状だったが、加熱することで溶解し、黒い塊のような物質に変化します。

酸素を嫌う物質を、グローブボックスという特別な雰囲気中に制御した装置の中で取り扱っています。



沖縄で聞いた、「三線」の音色に魅せられて

5年ほど前から、沖縄民謡などで演奏される「三線」を習いに教室に通っています。先生は波照間島出身の方です。沖縄に旅行に出かけたときに演奏している方を見て「自分もやってみたいな」と思いました。せっかく自分の三線を買ったので、昼休みや夕方の学生が帰った後に暇を見つけては研究室で練習しています。三線は先生に紹介して頂いた宮古島の工房で注文したものだから、なかなか良い音が出ます。中学生くらいまでヴァイオリンを習っていたので弦楽器には馴染みがありましたが、楽譜が漢字で書かれていてまったく違うのではじめは驚きました。歌詞も沖縄の言葉で意味がよく理解できなかったりもしますが、琉球文化を感じられる音色が気に入っています。



MY FAVORITE



管状電気炉を使って試料の高温加熱実験を行う準備中です。

TERM INFORMATION

燃料デブリ

核燃料が溶融し、原子炉内の様々な物質と融け合った生成物のこと。炉心溶融物、溶融燃料、コリウムなどとも呼ばれます。福島第一原子力発電所の燃料デブリでは、燃料を包む管に使われるジルコニウムの他に、原子炉の構造材であるステンレス鋼や制御用材料などとして利用されていた炭化ホウ素などの成分が含まれると推測されています。

固溶体

ある結晶を構成している1種類の原子またはイオンの一部が、同じ構造の結晶を作ることができる別の原子またはイオンと置き換わった状態。

ネプツニウム、アメリシウム

それぞれ、原子番号93と95のアクチノイド元素。ウランよりも重く、天然には存在せず、原子炉や加速器を用いた核反応で製造することができる。確認されている全ての同位体が放射性。

制御棒

原子炉内の中性子数を調整することにより、核分裂反応の進行を制御し、原子炉の出力を制御するための重要部品。

に桐島教授たちは、ウランや毒性の高い放射性物質が模擬デブリからどの程度溶け出すかを調査するため、ネプツニウムやアメリシウムを加えた模擬デブリを合成して同様の観

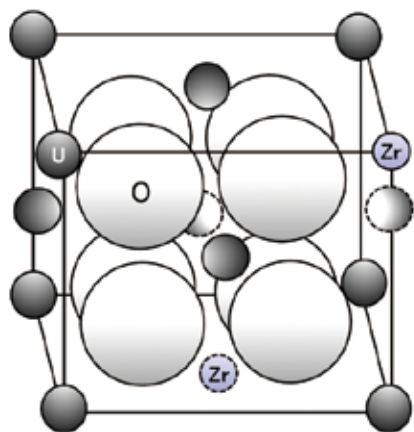
察を行いました。しかし放射性物質が海水中に溶け出す割合は極微量。これにより、「燃料デブリの固溶体化が進むことで化学的に安定化し、放射性物質が水や海水に溶け出しにくくなる」と結論付けた桐島教授は、固溶体化が燃料デブリの長期保管や処理・処分に向けた技術開発の鍵になると考えています。「使用済み核燃料を安全に扱う従来の技術・知識を応用することで、処理・保管することも十分可能と言えるでしょう」。

さまざまな条件下で合成し燃料デブリの実態を解き明かす

燃料デブリには他にも、制御棒に含まれる炭化ホウ素や、原子炉建屋底部に使用されているコンクリートなどさまざまな物質が関与している可能性があります。また、高温状態から冷却水などで急冷された場合に化学的性質はどのように変化するのか、酸素濃度によってどのような影響を受けるのか、といったことも今後の検討課題です。「今回の分析は炉内で最も起こりうる条件を想定したものでしたが、他にもさまざまな条件が考えられます。どのような条件でどのような燃料デブリが生成されるのか、その燃料デブリはどのような性質を持つのか。それらを一つひとつ検証し、基礎科学の側面から燃料デブリの安全な取り出しと保管、処理・処分についての検討をサポートしていくことが、私たち大学の人間が果たすべき役割だと思っています」。

した高放射性の微粒子と異なり、電子顕微鏡による観察だけでなくX線やガンマ線、レーザー光などさまざまな方法で分析することができるため、実際の混合物に近い性質を明らかにすることが可能です。「その結果見えてきたのが、二酸化ウラン、ジルコニウム、ステンレス鋼を原料とした模擬デブリが“固溶体”を形成するということでした」。

“固溶体”とは、核燃料と周囲の金属材料が高温で一緒に溶け、その後冷却するプロセスの中で形成されると考えられる物質で、マグマが冷えて固まり、岩石となるプロセスでも生じる物質です。事故直後に冷却のため海水が使われていたことをふまえ、研究室では固溶体化した模擬デブリを純水や海水に浸け、1年以上にわたって結晶構造の変化を観察してきました。しかし特に大きな変化はなく、化学的に安定であることが分かりました。さら



二酸化ウランの結晶にジルコニウムの原子が入り込むことで固溶体を形成。酸素がほとんどないときと比べ、微量の酸素が存在するときの方が固溶体化は早く進みました。

放射性廃棄物の地層処分に必要な 基礎研究の強化

地下300mよりも深い地層中に 放射性廃棄物を埋設する

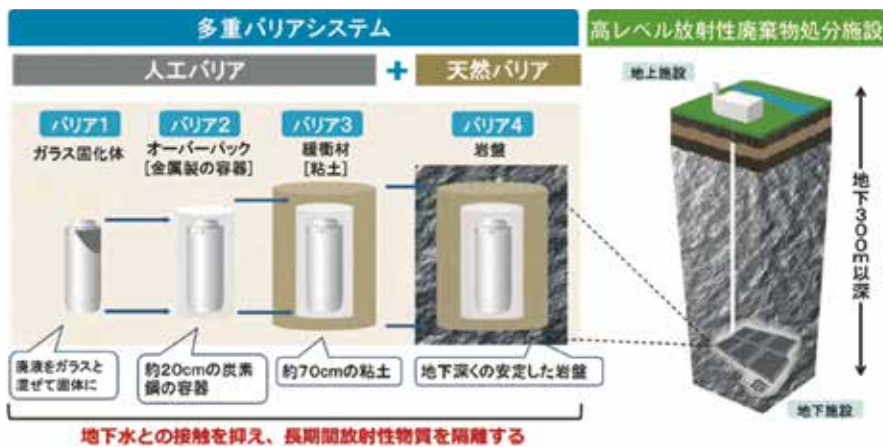
「放射化学アプローチによって燃料デブリの化学的性質を明らかにし、今後の保管や処理・処分方策を検討する材料を提供するバックエンド研究を行うことは、放射化学の専門家としての役目であると同時に、責任でもあります」。桐島教授がこのように語る理由は、長年にわたって放射性廃棄物の処分に関連した研究を続けてきたからに他なりません。

「日本では現在、原子力発電環境整備機構 (NUMO) などが中心となり、地下300m以深に地層処分場をつくってガラス固化体などの高レベル放射性廃棄物を処分する計画が進められています。炭素鋼の容器に入れたガラス固化体を緩衝材となる粘土で覆い、さらに地下深くの岩盤に埋めることで何層ものバリアをつくり、地下水との接触を抑えつつ長期間にわたって放射性物質を隔離する計画です」。地下は何億年という単位で安定した環境を維

持することができ、地表の影響も受けにくいことから、日本だけではなく世界各国で地層処分に向けた動きが活発化しています。一方、火山や活断層など自然災害や人的災害の影響を受け難い地質環境の選択が求められることから、処分場の建設が可能な地域は必然的に限られてきます。「候補地となった地域の住民からは当然反対意見も出てきますので、地層処分の安全性を正確に評価し、講演会や住民説明会などの場で紹介することで理解促進に務めています」。

深部地下の放射性物質の動きを 共同研究でシミュレーション

「北海道には日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターがあり、放射性廃棄物の地層処分にあって技術的な信頼性を確認するため、実際の深地層を活用した研究開発が行われており、私たちも共同研究に参画しています」。例えば、地下350mの地点にある調査坑道にはガラス固化体の代わりに模擬オーバーパックと緩衝材で作った実物大の人工バリアがあり、センターでは埋設後、このバリアや周辺の岩盤がどのように変化するか、地下水の中を物質がどのように移動するのか等を計測・観察しています。「バリアが壊れたあと、放射性物質がどのように動くのかを知るのは非常に重要で、計算によってシミュレーションします。そこで



高レベル放射性廃棄物を処分するための多重バリアシステムにより、地下に埋設した後も長時間放射性物質を隔離することができます。出典: 経済産業省資源エネルギー庁 (<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018html/3-4-4.html>)

趣味の時間はもちろん、家族との時間も大切にしています

休日は三線の教室に行くこともあります。あとは子どもたちともよく遊びに出かけますね。小学5年生の男の子と小学2年生の女の子がいるので、遊び盛りということもあって近場の公園や遊園地に連れていきます。最近は息子が好きな家庭用ゲーム機で対戦ゲームをしたり、近所の公園 (仙台市) で娘の自転車の練習に付き合うことが多いかもしれません。夏休みに遠出をすることもあり、今年は家族で気仙沼大島に海水浴に行きました。去年も行きましたが、島や海が好きなので気に入っています。沖縄に惹かれるのと同じ理由かもしれません。

OFF TIME





試料の顕微鏡観察の
一コマ

重要となるのが基礎となる熱力学のデータであり、信頼できる良質なデータを測る技術も必要になってくるため、私が学生時代から行ってきた基礎研究の重要性を改めて実感しています」。現在、桐島教授はこの基礎研究に関連し、深部地下水中で長寿命の放射性核種が化学的にどのように振る舞うかを、幌延センターで採取した実際の深部地下水を用いた実験とシミュレーションで明らかにしようとしています。

放射性廃棄物の問題は 後世のために解決すべきもの

一方、最近では企業からレアメタルやレアアースに関連した相談を受けることもあり、桐島教授の研究室では共同で調査する事例も増えてきています。「レアメタルやレアアースは鉱石から採取される非鉄金属ですが、この鉱石にはウランなどの放射性物質が含まれていることが多く、精錬した際にゴミとして取り出されます。こうした放射性物質の分析や安全な取り扱い方法について相談されるケースがあ

るので、分離・測定プロセスの開発にも携わっています」。レアメタルやレアアースは数多くの工業製品の原材料として非常に重要な元素ですが、海外では取り出された後の放射性物質が適切に処理されないまま投棄されたこともあり、問題になってきました。「天然放射核種(NORM)問題とも言われています。発展途上国に多いのですが、日本では環境意識の高まりもあって安全に安定した形で処理し、企業の社会的責任を果たしたいという需要が増えてきているようです」。

原子力発電により排出される高レベル放射性廃棄物をはじめとした放射性物質のゴミ問題は、これまであまり注目を浴びることはありませんでした。しかし「後世のことを思えば誰かが専門的な知識を持ってきちんと取り組まなくてはならない問題でもある」と桐島教授は強調します。「福島事故をきっかけに“やはり原子力は怖い”と思われるようになってしまいましたが、私たちのような専門家がきちんと安全性を評価し、長期的なリスクも分かり易く説明していくことで、市民の皆さんが過度に不安を感じることなく日常生活を送ることができるのが一番の理想。そのためにも、こうした放射性物質の分析や安全な取り扱い方法について、今後も真摯に向き合い続けたいと思っています」。



模擬デブリ中の元素分布の分析

TERM INFORMATION

ガラス固化体

使用済核燃料を再処理して、再使用できるウランやプルトニウムを抽出後に残る、高放射性廃液をガラスで固めたもの。高レベル放射性廃棄物となる。

日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を行う研究センター。国内唯一の稼働中の深部地下研究施設を有する。

天然放射核種(NORM)問題

地殻中に存在する天然の放射性核種。ウランやトリウムとその壊変系列核種(放射性壊変した後の核種も放射性核種となり娘核種や子孫核種といった放射性の壊変生成物をつくること)が代表例。



FOREFRONT REVIEW

磁性材料は、磁気記録技術、モーター、電力変換技術など、社会の至るところで広く活用されています。これら様々な磁気デバイスの多様な機能性は、すべてナノスケールでのスピンの振舞いにより発現するものです。つまり、ナノスケールでの磁気機能解明と高制御化が磁気デバイスの高性能化の鍵となります。岡本研究室では、このナノスケールにおける磁気機能解明とその制御に軸足を置き、多様な分野における次世代高性能磁気デバイスの創出を目指しています。



情報爆発、脱炭素という社会課題に 最先端の磁性材料研究のアプローチで挑む

天然磁石が方位磁針として利用され始めたのが磁性材料応用の始まりと言われます。世界で初めて人工的な磁石がつけられたのは、およそ100年前。東北大学本多光太郎先生のKS鋼でした。以降、さまざまな高機能の磁性材料が開発され、今や社会の中で非常に重要度の高いキーマテリアルとなっています。

磁性材料の用途には大きく3つの分野があります。まず1つ目は、永久磁石と電磁コイルの作用で回転軸を動かすモーター。家電・産業用モーターや、EVなど移動体用モーターがあります。2つ目は、ハードディスクなどの磁気記録媒体。ディスク表面に磁性層をつくり、磁気ヘッドで磁化して情報を記録する仕組みで、データセンターなどで膨大なデータが記録保存されています。3つ目はパワーエレクトロニクスと呼ばれる分野の受動素子。パワーエレクトロニクスとは、身の回りの電子機器からEVや送電ネットワークなどの高効率化に欠かせない電力変換・制御技術です。これらの用途をイメージしてみると、ほぼ社会生活のすべての場面で磁性材料は重要な役割を果たしていることが分かります。

今、情報爆発の時代と言われ、デジタルインフラに多大な負荷がかかっている状況があり、一方で脱炭素がこれからの重要テーマとされています。EVモーターの高機能化、データセンターなどの大幅な効率化、パワーエレクトロニクスのエネルギー変換効率の向上など、磁性材料の一層の飛躍が期待されています。

「これからの社会課題を解決していくためには、今までの研究や技術の延長では対応できない。探り尽くされたと思われる研究分野でも、最先端の観察・計測技術を活用した新しいアプローチから画期的な発見や材料創成に結びつくことがある」。そう話す岡本聡教授は、これまで継続してきた磁性材料の先端研究の成果から、さらに社会変革につながる戦略的ミッションに挑戦しています。

多元物質科学研究所
無機材料研究部門
ナノスケール磁気機能研究分野 教授

岡本 聡

OKAMOTO, Satoshi

1968年滋賀県生まれ。1997年東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 博士課程 修了。1997年東北大学科学計測研究所 助手、2007年東北大学多元物質科学研究所 准教授、2020年東北大学多元物質科学研究所 教授。所属団体／日本応用磁気学会、日本金属学会、電気学会。受賞／2014年日本金属学会 功績賞、2014年文部科学大臣表彰 科学技術賞 研究部門、2021年第54回市村学術賞 貢献賞

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

高性能磁性材料が 次世代パワーエレクトロニクスを担う

磁性材料研究の 3つの分野に携わる

磁性材料が使われる主要な分野として、永久磁石（硬磁性）、ハードディスク（半硬磁性）、パワーエレクトロニクス（軟磁性）の3つがあります。

岡本教授は、軟磁性材料を専門とする指導教員のもとで磁性研究を始めましたが、その後、博士号を取得してからはハードディスクの研究に携わり、約25年の研究歴があります。次いで、「2010年、中国の日本への禁輸措置によるレアア

スショックの影響により、レアアース（希土類）を使わない磁石の開発を目標とする国家プロジェクトに参画して永久磁石の研究を始め、こちらは13年位研究しています」。

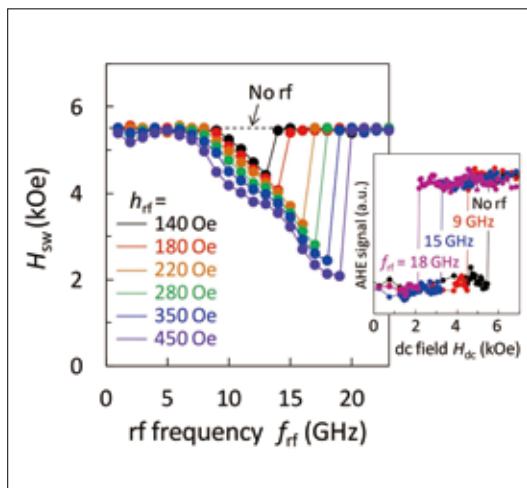
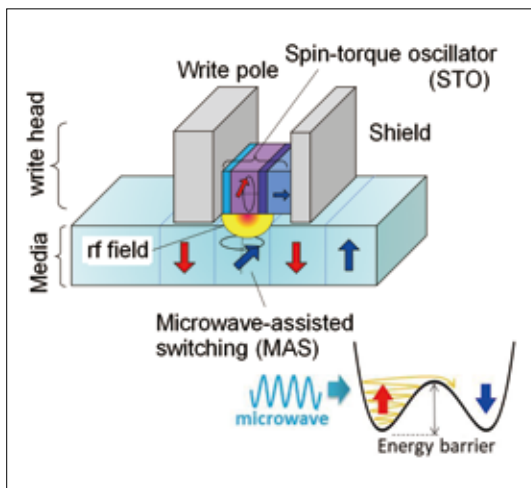
軟磁性材料についての研究は、1990年代半ば頃までは国内外で盛んに行われていましたが、研究開発の主体が産業界に移行したことや、スピントロニクスやハードディスク分野に多くの研究者が流れたことにより、2000年以降は特に基礎研究が停滞していたと岡本教授は指摘し

ます。「軟磁性材料は最初に学んでバックグラウンドとして私の中にありましたが、基礎研究の停滞がいちばん問題になっているのは実はこの分野なのです」。

パワーエレクトロニクス分野での 損失が課題

新幹線やEVの高級車ではパワーエレクトロニクスを制御するためのパワー半導体として、高効率なSiC（炭化ケイ素）が使われており、今後、さらに高効率なGaN（窒化ガリウム）の利用が期待され

ています。「これらのパワー半導体を用いることで非常に高効率な電力変換が可能ですが、



概略図（左）と原理実証実験の結果（右）

ハードディスクの記録密度向上は急務の課題でしたが、岡本教授のグループはマイクロ波アシスト記録方式について世界で初めて原理実証実験に成功。今後の研究開発の進展に大きな貢献を果たしたとして第54回市村学術賞貢献賞を受賞しました。

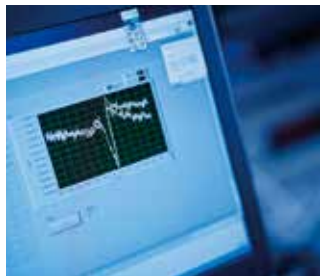
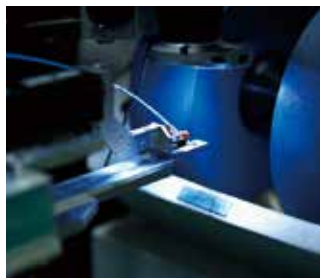
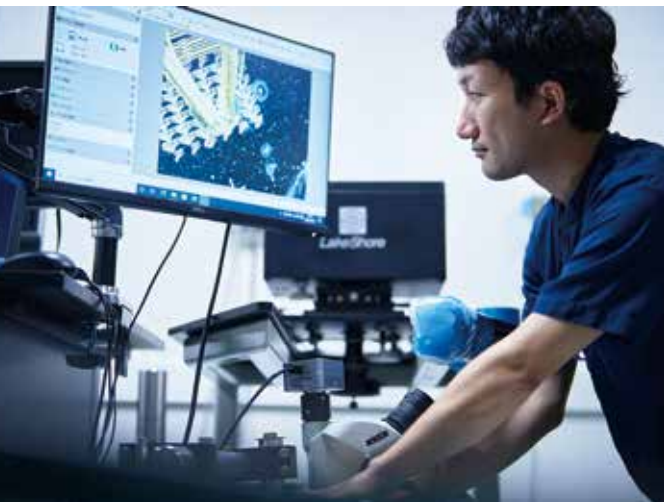
関心が向いたテーマの本を、楽しむ

本が好きで、いろんな分野の本を読みますね。経済書、哲学書、人文、日本史、宗教など。ただただ読んで楽しむというスタイルです。この前読んだドイツの新進気鋭の哲学者マルクスガブリエルの本は新しい実在論がテーマになっていますが、新しい技術で今まで見えてなかったものが見えてくると全く違う世界がそこに広がる、という研究の姿にも似ていて、とても面白かった。

歴史も好きですね。滋賀県大津市出身ですが、古代遺跡が多い環境でした。有名な大化の改新の後、中大兄皇子が飛鳥から近江の大津に遷都し、即位して天智天皇となって、ここで律令制度の基礎を固めていくのです。つまり大津は1350年以上の歴史を持つ古都で、長い歴史の積み重ねに常に囲まれている環境で育ちました。

MY FAVORITE





マイクロ波に対する磁性体の応答を計測。ナノスケールの磁性体からの微弱な信号を高感度に検出しています。

パワーエレクトロニクスにおいて足を引く張っているのが軟磁性材料なのです」と岡本教授は言います。

現状では軟磁性材料での損失が非常に大きく、次世代パワーエレクトロニクスのボトルネックとなっている状況です。「見回してみると軟磁性材料の基礎研究を行っている大学の研究者がほとんどいない。そこで、4年位前から、危機感を共有する共同研究者の方々と一緒に取り組み始めました」。岡本教授は、2021年より文科省の革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業に採択され、超低損失軟磁性材料の創成を目指した研究を本格的に進めています。

カーボンニュートラルにつながる高効率化

磁性材料の損失を低減する、効率性を高めるという課題については、ハードディスクの次世代記録方式とも基礎的な部分ではつながっていると、岡本教授は話します。「磁気記録において、スピンの外部磁場に対してどのような反応をするか。もし高効率の磁化反転ができれば、記録密度向上に寄与するはず、というテーマで、もう10年以上研究している」と言います。

岡本教授は、スピン制御をGHz帯のマイクロ波を使うことで、高効率の磁化反転ができることに着目し、世界で初めて

マイクロ波アシスト方式の実証実験に成功しました。2021年、日米の企業がこの技術を使ったハードディスクを実用化し、2022年、岡本教授は第54回市村学術賞貢献賞を受賞しました。

実用性の面では、この研究はハードディスクの超高密度磁気記録技術という課題に向けて実施されたもので、1枚のディスクあたりに大量のデータを詰め込むためのものです。「超高密度磁気記録の実現は情報爆発に向けたデジタルインフラとしての重要性だけでなく、脱炭素にもつながるのです。ハードディスク1台当たりの電力消費は小さなものですが、大規模なデータセンター全体で見ると大幅な省電力化につながります。ハードディスク1台当たりの情報量が増えると、情報量当たりの電力消費の削減に直結するわけです」。

情報爆発と言われる中、いまデータセンターの増加に伴う電力需要の拡大が大きな問題となっています。「大規模なデータセンターだと原子力発電所1基分の電力が必要とまで言われている。技術が進歩しない限り、データセンターの電力消費は今後ますます増えることになる」と岡本教授。

磁性材料研究、とくに高効率な磁性材料の研究開発の進展が、情報爆発や脱炭素への対応にもつながると、大きな期待が掛けられているところです。

TERM INFORMATION

硬磁性・軟磁性

磁性体は外部磁場に対する応答性の違いから、「硬い、軟らかい」と分類される。外部磁場に対して応答しやすいのが軟磁性であり電磁石や磁気ヘッドなどに用いられる。一方、外部磁場に応答しにくいのが硬磁性であり、永久磁石が該当する。磁気記録は、記録情報を保持するだけでなく情報の書き換えも必要なため、硬磁性と軟磁性の中間的な半硬磁性と分類される材料が用いられる。

パワーエレクトロニクス

電力変換・電力制御技術であり、身の回りの電子機器、電車やEVなどの電動機、スマートグリッド、太陽光発電などの高効率化に不可欠な技術。パワー半導体と受動素子の組み合わせで構成され、軟磁性材料は受動素子として重要な役割を果たしている。

レアアース

ネオジムやジスプロシウムなどネオジム磁石に欠かせない元素であり、特にジスプロシウムはEVやハイブリッド車の駆動用モーターに重要であったが、産出地が中国に限られている。2010年のレアアースショックを機に産学官を挙げてジスプロシウムフリー磁石の開発に取り組み、これを達成した。一般的にレアアースフリー磁石と呼ばれるものは、これである。

スピン

電子の持つ角運動量の性質であり、磁性の起源。アインシュタインが行った生涯唯一の実験と言われるアインシュタイン-ドハース効果(1915)で磁性の起源が角運動量であることが実証され、その後、ディラックによりスピンの存在が理論的に証明された。

磁化

磁性体ではスピンの揃った方が安定であり、その巨視的な量を磁化と呼ぶ。一般的に鉄などの磁性体はマイクロにみると磁化の方向がバラバラであり、全体としては磁化が打ち消された状態(磁化ゼロ)となっている。一方、永久磁石は磁化が揃っているため、材料としての磁化を持っている。

磁化反転

外部磁場を印可すると、磁化はその方向に揃おうとする性質がある。元々の磁化方向と逆向きに外部磁場を印可すると、磁化が反転する現象。永久磁石では、この磁化反転が起きないことが重要であり、一方で、磁気記録では磁化の向きで情報の記録を行っているため、記録安定性の観点では磁化反転が起きないことが有用であるが、書き込みを行う場合には磁化反転のし易いことが求められる。

データセンター

インターネットの情報管理を行う建物。クラウド化と情報爆発と呼ばれるデジタル社会の進展により、年間10兆円規模で大規模なデータセンターが世界中で建設されている。情報セキュリティの観点からも、国内でのデータセンター設置が進められている。

先端計測・観測技術により 磁性材料研究に新たな展開

ナノテクの進展と バルク材料の研究

たとえばハードディスクの磁気ヘッドや記録ディスクは、半導体素子や集積回路などと同じくナノテク技術で作られています。「ナノテク技術が進化することによって発展してきた技術分野は数多くありますが、ハードディスクもその一つです」と岡本教授は説明します。スピントロニクス研究もナノテク技術の進化と歩調を合わせて発展してきました。

一方で、磁石や軟磁性材料というのは

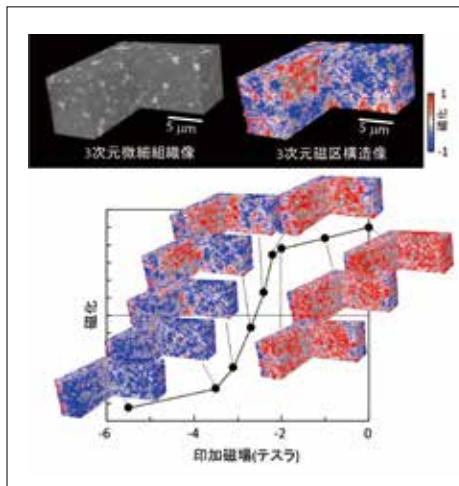
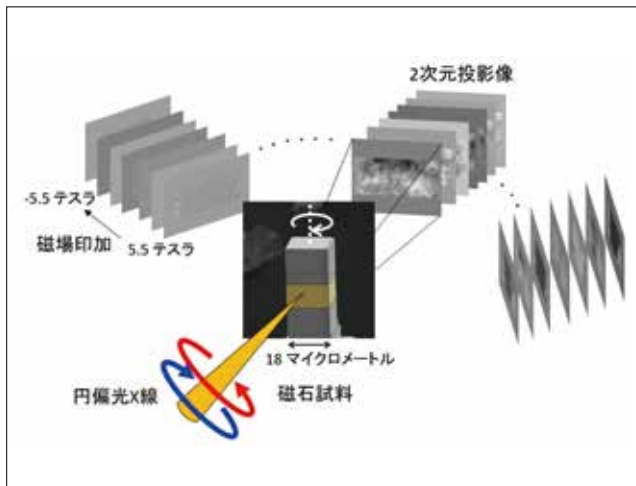
ナノテクとは対極にあるバルク材料です。「昔は大学の研究室でもバルク磁性材料の製造装置を持っているところがありましたし、この研究室も数代前の教授のころはバルク磁性材料を扱っていたのですが、バルク磁性材料研究の行き詰まりと同時に、最先端のナノテク技術を駆使した磁気記録の研究にシフトした経緯があります」と振り返ります。

つまり磁性研究に関して、ナノテク技術の進展はスピントロニクスや磁気記録研究を進化させたプラス面と、従来のバルク

磁性研究が停滞したマイナス面があったという見方です。しかし近年の計測技術におけるナノテク技術の進展が、再びバルク磁性材料研究に新たな光を当てていると言えます。放射光を始めとした先端的な計測技術の進化によって、「バルク材料であってもナノスケールで精密に測定解析できるという環境が整ってきた」。そのことは、大きな変革であると岡本教授は捉えています。

計測技術の進歩による 新しい研究の展開

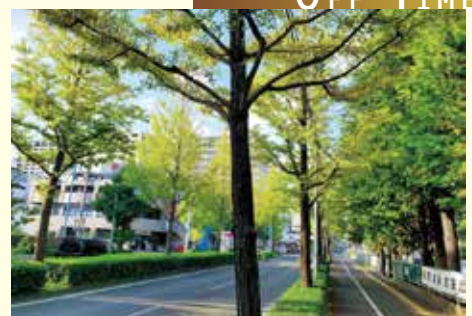
「バルクは塊としての材料だけど、その特性を決定しているのはナノスケールの領域である」と岡本教授は言います。だから現在の最先端の計測技術を駆使して改めてバルク磁性材料を観測してみると、過去に研究され尽くしたと思われていたバルク磁性材料研究は、まだまだ未解明の課題が沢山残されていました。「脱炭素などの社会課題の解決を目指す上でバルク磁性材料の重要性が高まっている中で、新たな観点でもう一度研究分野



磁気トモグラフィー測定の大略図(左)と3次元磁区構造の変化／永久磁石の性能を反映する磁区構造変化について磁石内部で変化する様子を世界で初めて3次元可視化。岡本聡教授他、関西学院大学、高輝度光科学研究センター、物質・材料研究機構、大同特殊鋼株式会社との共同研究で、文科省元素戦略磁性材料研究拠点の助成を受けて実施されました。

きれいな並木道を通って、およそ13kmのラン

高校時代は陸上部で長距離、種目でいうと1,500mと5,000mを走っていました。それ以降は、走ることは苦しいだけで「こんなもの二度とやるか」と思っていたのですが、コロナ禍で週末は食べ歩きなどできなくなったので、自然にジョギングの頻度と距離が増えました。今では、土日にそれぞれ13km位、走ってますね。だいたい一周り走って1時間ちょっとのコース。台原森林公園のある旭ヶ丘から片側2車線のきれいな道を幸町方面に向かって走ります。この区間は歩道が広く、途中大きな公園があったり、ずっときれいな並木が続いていて、ランナーも多いですね。ガス局から右に折れ、しばらく走って北四番丁通りから愛宕上杉通りに出ると、またきれいな銀杏並木。そこを北上して旭ヶ丘に戻ります。



OFF TIME



真空薄膜装置。真空チャンバー内で高電圧を加え、発生したイオンをターゲット材料に高速で衝突させると、材料原子が叩き出されて基板に薄く堆積し薄膜を形成します。



磁化測定装置。測定原理自体は電磁誘導の法則とシンプルでありながら、ナノメートル厚みの磁性薄膜の磁化を高感度に測定できます。

を見直してみると、沢山できることがあるのだ」と気づいたと言います。

岡本教授は、駆け出し研究者の頃に行っていた磁気記録研究は、自分一人で研究することが多かったと言いますが、永久磁石やパワーエレクトロニクス分野の研究に携わるようになり、非常にたくさんの人たちと共同で研究するようになりました。産業界の第一線の人達、放射光の基礎研究をしている研究者、技術開発の専門技術者など、たくさんの人たちとコラボレーションを通じてバルク磁性材料研究を行うスタイルで最近の研究を進めているそうです。

「基礎研究と社会課題が密接に結びついている時代なので、企業や放射光施設など立場の異なる研究者とのコラボレーションが今まで以上に重要」と岡本教授は捉えています。そうした研究スタイルで実現した研究成果が2022年夏に発表されました。

永久磁石内部の変化を世界で初めて3次元可視化

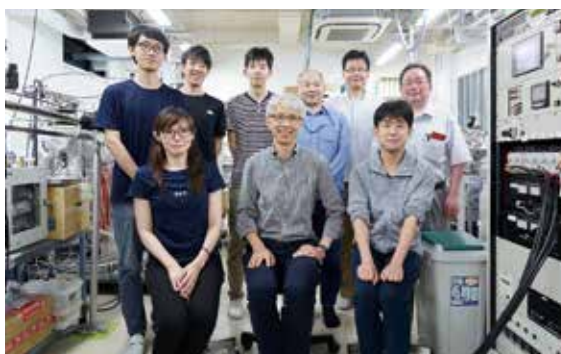
永久磁石の性能を表す指標である保磁力について、その発現メカニズムは長年の未解決問題でした。「永久磁石は磁石内部の磁化(スピン)が揃った状態となっています。外部磁場を強くしていくと磁化の乱れが生じ、最終的に外部磁場の方に反転します。この磁化反転に必要な外部磁場

の強さを保磁力と言い、これが磁石の強さを表す指標となります」と、岡本教授は保磁力を解説します。

岡本教授のグループは、大型放射光施設SPring-8で放射光を用いた磁気トモグラフィー法により、高性能な永久磁石内部の微細な磁化状態の変化を3次元的に可視化することに世界で初めて成功したのです。100年以上の歴史を持つ磁性研究の中で、初めて内部構造の変化を捉えたこととなります。この成果によって、さらに超高性能な次世代の磁石開発につながると期待されています。

「2023年にファーストビームが出るとされている東北大学キャンパス内の次世代放射光施設は、実は磁性材料研究にとってもすごく重要です。磁性材料の測定では数十倍から100倍位感度が高くなる予定で、これまでは一週間かかっていた測定が数時間で完了します」。そうすると、今回の成果からさらに短い時間スケールの中で、磁化の振る舞いがより精細に観察できるようになるのではと期待されています。

計測技術・観測技術の進化によって、磁性材料研究の可能性がさらに大きく広がってきました。



岡本研究室のメンバー。岡本聡教授、菊池伸明准教授他、研究スタッフ、大学院生、学部4年生まで10人以上が、ナノスケール磁気機能研究分野のさまざまな研究に取り組んでいます。

TERM INFORMATION

バルク

塊としての材料。バルク材料研究は長い歴史があるため、古い学問領域である印象を受ける。しかしながら、バルク特性を決定付けているのは多くの場合はナノスケールでの特性であり、最先端のナノテク技術に基づいた研究手法により、ナノスケールでの特性とバルク特性との相関を調べることが可能となってきた。

スピントロニクス

スピン制御に基づく電子工学。これまでのエレクトロニクスは電子の電荷制御のみを行っていたが、電荷制御に加えてスピン制御を行うことで高次電子デバイスに繋がるのが期待されている。東北大学は世界でも有数のスピントロニクスの拠点大学。

ナノスケール

1ナノメートルは 10^{-9} メートルであり、原子の大きさが凡そ0.1ナノメートル。

磁気トモグラフィー

トモグラフィーは断層像や3次元像を得るための手法であり、X線CT(コンピュータトモグラフィー)は病院で体の断層像撮影に利用されている。磁気トモグラフィーは、放射光を利用した磁化状態に対するトモグラフィー測定であり、磁石内部の磁化の分布(磁区)を3次元的に可視化することが可能となる。



FOREFRONT REVIEW

タンパク質の立体構造はその機能と深く関連しており、機能を発揮する際にどのような構造の変化を起こすのか興味を持たれてきました。ナノサイズであるタンパク質が、高速の時間スケールで動く様子を原子の動きまで詳細に捉えるには新たな技術が必要です。南後研究室では、X線自由電子レーザー、放射光、電子線などの量子ビームを用いて、タンパク質の中で実際に起こっている化学変化や構造変化を可視化し、タンパク質分子の合理的設計や新機能を持つ分子の創製を目指しています。



タンパク質の機能メカニズムの解明に 革新的なブレークスルー

私たちのからだの主要な構成要素であるタンパク質は、光や化学物質などの刺激を受けてその立体構造が変化することが知られています。特に細胞膜を構成する膜タンパク質は、物質を細胞膜の内外へ運ぶポンプなどの役割を持っています。たとえば、イオン・栄養素など生命維持に必要な物質を運搬したり、またホルモン、光、熱、音などの感覚受容器と言われる細胞外情報の高感度センサーとして機能するなど、生体にはなくてはならないさまざまな働きをしています。

膜タンパク質の構造や機能を詳しく解明することは、生物物理学、構造生物学上の重要テーマとなっています。タンパク質が働くしくみを知るには、そのタンパク質がどんな形をしていて、どんな種類の原子があるのかを見る必要があります。しかし従来、原子が動く前と動いた後の観測しかできませんでした。

世界初のX線自由電子レーザー(XFEL)施設が2009年にアメリカに誕生し、世界2番目の施設SACLAが2012年に日本に完成しました。XFELは非常に明るく、数10フェムト秒台の非常に素早く起こる変化も捉えることができる光です。

このSACLAのXFELによって、タンパク質の機能メカニズムの解明に画期的なブレークスルーをもたらす研究成果が、2016年12月、世界的な科学雑誌『Science』に発表されました。論文の筆頭著者は、南後恵理子教授(当時:理化学研究所放射光科学総合研究センター研究員)。タンパク質が機能しているその瞬間の動きを見たいとの強い意志を持ち続け、タンパク質が働く、その途中の原子の動きを動画撮影することに初めて成功したのです。

膜タンパク質の研究は、タンパク質が働く途中の原子の動きを観察できるようになったことによって、その形と機能の関わりに対する理解をさらに深めることができるようになりました。こうした生体分子の物理的・化学的発想の研究は、これからさらに新しい医薬品開発などイノベーションへの貢献が期待されています。

多元物質科学研究所
有機・生命科学部門
量子ビーム構造生物化学研究分野 教授

南後 恵理子

NANGO, Eriko

1975年宮城県生まれ。2004年東京工業大学大学院理工学研究科 化学専攻単位取得満期退学(2007年理学博士取得)。2000年日本学術振興会 特別研究員DC1。2004年東京工業大学大学院 理工学研究科 助手(2007年より助教)。2010年理化学研究所 放射光科学総合研究センター リサーチアソシエイト(2013年より研究員)。2019年京都大学大学院 医学研究科 助教(同年12月より特定准教授)。2020年東北大学 多元物質科学研究所 教授。2021年理化学研究所 放射光科学総合研究センター分子動画研究チーム チームリーダー(兼任)。所属団体/日本蛋白質科学会代議員、日本生物物理学会理事、日本結晶学会評議員。受賞/2021年第18回(令和3年度)日本学士院学術奨励賞、2022年東北大学ディスティングイッシュドリサーチャー、第18回(2021年度)日本学術振興会賞

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/nango/html/nango.html>
https://www.sris.tohoku.ac.jp/researchers/nango_eriko_html

X線自由電子レーザーで 世界初のタンパク質動画撮影

細胞の元である タンパク質への探究心

南後教授の研究は今「量子ビームによる構造生物学の研究」と表現されていますが、元々の研究の始まりは、有機化学だったと言います。「学部生時代は理学部化学科の天然物化学という講座からスタートしました。微生物がつくる二次代謝産物という化合物がありますが、その中には抗生物質も含まれます。私は抗菌剤などに用いられるアミノグリコシド抗生物質(アミノ糖を構成成分とする抗生物質)が、どのようにつくられているのか調べる研究を行っていました。微生物の中で複雑な骨格を持つ抗生物質をつくるのは酵素なのです」。

生体の中では、さまざまな化学反応が起こっています。それぞれの反応を引き起こすために触媒として必須のタンパク質が酵素です。「微生物由来の酵素によって抗生物質がつくられるとすれば、では、どのような酵素の反応で新たな物質がつくられているのか。」そこに大きな興味を感じ、酵素の立体構造を解いてみよう、というのが南後教授の探究心の発端であったと振り返ります。

タンパク質は20種類のアミノ酸から構成されており、その構造解析は容易なことではありません。「その構造を解くためにX線結晶構造解析という技術を勉強し始めました」。

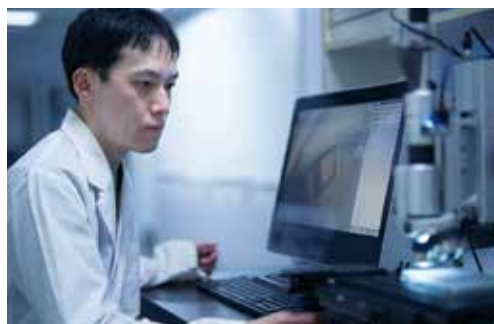
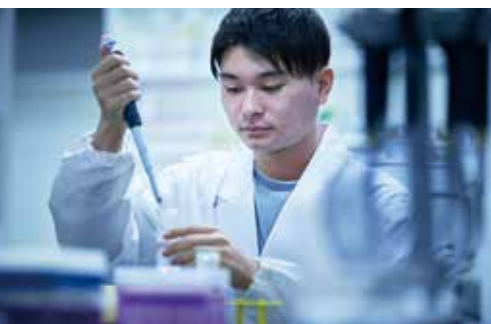
当時、物質の構造を原子レベルの動き

まで見るような技術はありませんでした。「構造決定に必要な回折像を得るのに、X線を結晶に照射するのですが、当時は1枚の回折を得るのに大体30分はかかっていました。その間に何か反応が起こっていたとしても平均構造になってしまっていて、実際のところ途中でどのように動いているのか見ることは難しいことでした」。つまり静止状態しか見れず「どうしてもタンパク質が動いて機能している瞬間が見たい」という気持ちが増々高まり、南後教授のその後の研究の大きな原動力となったのです。

X線自由電子レーザーとの 出会いから

大学の助教から放射光施設のある理化学研究所放射光科学研究センター(SPring-8)のポスドクに転身し、タンパク質の構造解析の技術を学んだ後の2012年、SPring-8の隣地で、世界2番目となるX線自由電子レーザー(XFEL)施設SACLAが供用開始しました。「従来のX線結晶構造解析では、十分な回折強度を得るために強いX線を結晶に長時間照射する必要があることから、結晶中に放射線損傷と言われるダメージが起こります。ところが、SACLAのXFELを使うと、高強度のX線であるので、非常に短い時間で観測を終えられるため、試料の放射線損傷が顕著に現れる前の分子構造を捉えることができます」。

南後研究室では、生命現象を支える重要な生体構成物質であるタンパク質などをテーマに、化学・生物学・物理化学の学際的研究に取り組んでいます。「私は化学出身なのでよく液体クロマトグラフィー装置や他分析装置を使っていましたが、その体験と知見がXFELの実験をする時や装置設計をする時にすごく役に立ちました」と南後教授は話していました。



いつか空港ピアノを弾いてみたい

私は子どもの頃、ピアニストになりたかったのです。音楽の道を目指していて、厳しいレッスンを受けていました。でもコンクールを受けても全然通らなかったことがあり、才能ないのかな、他の道の方がいいのかな、と思って、ピアノの道は16歳の時にあきらめました。

ただ、今でも音楽とピアノは好きです。以前はいわゆる絶対音感があって、クラシック以外でも流行りの歌や曲を聴いて、すぐにピアノ曲に変換して弾くのが得意でした。

今はYouTubeで空港ピアノや駅ピアノを聴いていると「やっぱりピアノはいいな」と思って、若い頃だったらユーチューバーをやってみたかも、と思ったりします。もう少し練習できるようになったら、いつかは海外の空港とか駅で弾いてみたいですね。

MY FAVORITE



しかし、この新しいXFELによって、さまざまなタンパク質の動きを捉えられた訳ではなく、すぐに次の問題に直面することとなりました。つまりXFELは利用可能となったが、光の性能が従来と大きく異なることから既存の装置は使えず、測定するための装置を一から製作しなければいけなかったのです。「自分たちの目的と試料の条件に合わせてつくるしかなかった」と言います。

さらにそれ以前に、どんなタンパク質の機能を見るのか、またそれを反応させるためのしくみをつくる必要がありました。「まずは光で反応を起こすタンパク質を使って反応を見てみることにしました。自然界には光が照射されるとイオンを運ぶプロトンポンプと言われる膜タンパク質が知られています。これを用いてタンパク質の動きを捉える実験を行いました。昔からよく知られたタンパク質ですが、どうやってプロトンを運んでいるのか、そのしくみについて明確ではありませんでした」。

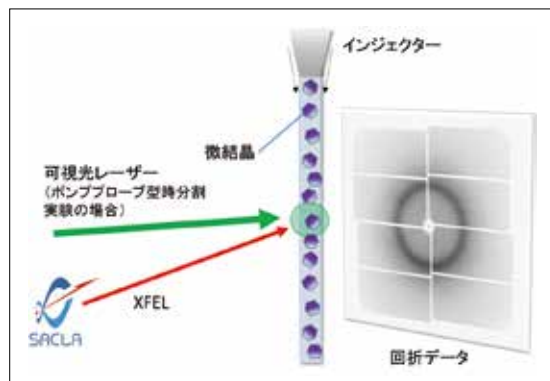
時分割SFXの装置作成で 世界初の試みに成功

「誰もやったことのない実験こそ、おもしろい」と南後教授は実験計画の立案に傾注しました。膜タンパク質の動画を

撮影するには、どのような装置を準備すればよいか、またどんな実験を行えばいいのか、手探りで計画は進められました。目的のタンパク質が規則正しく並んだ結晶をつくり、いろいろな角度で何枚も結晶からの回折像を撮影する必要がありました。強いX線レーザーにより一回の照射で試料は壊れてしまいます。そのため、結晶を連続してX線照射領域に送る必要がありました。しかし、結晶を流すのは容易ではなく、X線レーザーが確実に当たるようにするために装置と方法の両方から多くの検討を必要としました。最終的には、結晶に光を照射して反応を開始させ、一定時間後にX線レーザーにより画像を撮影する操作を繰り返し、得られたスナップショットをつないで分子動画をつくりあげました。これが時分割SFX（シリアルフェムト秒結晶構造解析）という方法です。

SACLAは当時世界で二ヶ所しかないXFEL施設でその利用は限られており、約半年に一回の実験しか機会がありませんでした。2015年1月、2015年7月の実験では多くのデータは得られず、3回目となる2016年2月に、実験が成功。膜タンパク質が働く途中の原子の動きを世界で初めて動画撮影することに成功した瞬間となりました。

この膜タンパク質の中で物質が運ばれるしくみについては、今までさまざまな説が議論され、結論が出ていませんでした。「動画撮影によって、光照射により形を変える分子から、水素イオンが次々に受け渡され、細胞の中から外側へ運ばれていくというしくみの詳細が明らかになったのです」。



時分割SFX実験装置写真と実験方法の概念図／概念図中央部の逆円錐形のパーツがインジェクターでタンパク質結晶の試料が噴出されます。XFELは写真右側から照射され、試料に当たり、左側に設置された検出器で回折点が検出されます。

TERM INFORMATION

X線結晶構造解析

電磁波の一種であるX線を結晶に照射すると、斑点から成る回折像が得られる。その回折点の強度データをフーリエ逆変換すると、結晶内分子の電子密度分布が得られる。その電子密度を基に各原子の位置を求め、分子構造を決定することができる。

XFEL

X線自由電子レーザー（X-ray free electron laser）の略称。光の速さに近い速さまで加速された電子ビームがアンジュレーターと呼ばれる磁石で構成される部分を通過する際にX線を放射し、十分に長いアンジュレーターを通過することによってXFELとなる。非常に強力で、光の波が揃った状態（レーザーとしての性質）であり、素早く変化の様子を観測可能（短パルス）との特性から、化学・物理・生物学分野における先端計測が期待されている。

放射光

電子を光の速度近くまで加速し、磁石で曲げられる時にその進行方向に放射される電磁波。放射光は明るい指向性が高い光であるなどの特徴がある。放射光を利用できるように加工して安全に提供するシステムが放射光ビームラインである。

プロトンポンプ

プロトンポンプは、細胞質から細胞外へとプロトンを能動的に輸送するタンパク質である。細胞膜内外でプロトン濃度勾配を形成することで、生体エネルギーへの変換などに利用される。

時分割SFX

光などによる反応開始から、X線などを用いて構造変化を探索する方法を一般的に時分割実験と呼ぶ。シリアルフェムト秒結晶構造解析は、連続的に送られる個々の結晶からのXFELによる回折像を取得する実験手法のことである。この方法と反応開始方法と組み合わせて、時間に伴う構造変化や反応を観察する実験方法が時分割SFXである。

進化したタンパク質観測手法で 創薬などイノベーションに期待

膜タンパク質は重要な 創薬のターゲット

膜タンパク質の内部の動きを初めて観測できたということを改めて考えてみたときに、次の可能性が期待されると南後教授は考えています。

タンパク質が、どのように反応を起こすのか、どんな構造変化が起こるのかということが分かってくると、たとえば酵素などの機能や反応を変えてみるなどタンパク質を使った応用の道が拓けます。分かりやすい例としては、新たな機構を持つ創薬などに結びつく可能性が大きく拓けたということです。

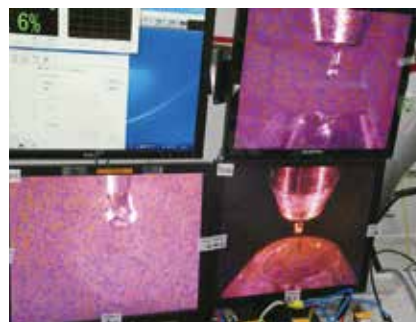
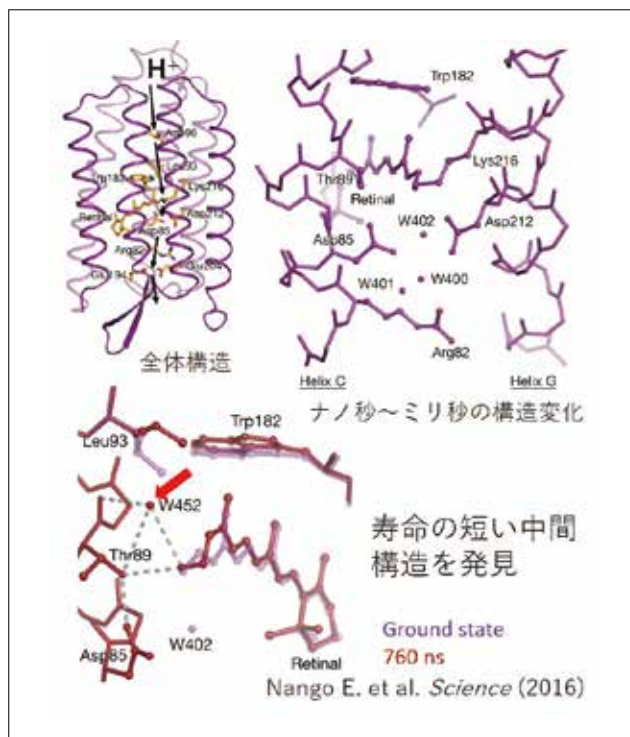
と病気になることもあります。例えば、膜タンパク質に結合して、働きを抑えるような分子など膜タンパク質に作用する医薬品が多く開発されています」と南後教授は説明します。

より汎用性のある 実験装置の技術開発へ

「こうした動きを捉える実験は可能となってきましたが、実はまだまだ開発しなければならぬことが数多くあります」。

「特に膜タンパク質はヒトのからだの中でとても大事な働きをしているので、その働きが損なわれる

「こうした動きを捉える実験は可能となってきましたが、実はまだまだ開発しなければならぬことが数多くあります」。2016年の実験で用いられた方法は簡単なものではありませんでした。まず、タンパク質の結晶を次々にX線レーザーの場所



光励起性タンパク質の分子動画解析／2016年SACLAでの実験の動画撮影によって、「光が当たると形を変えるレチナルという分子の近くに水分子が現れ、その近傍のアミノ酸であるスレオニン、そしてアスパラギン酸へと水素イオンが受け渡され、細胞の中から外側へ運ばれていくくみ」が明らかにされました。

島巡りを通して、アートを体感

絵をみるのが好きで、時間がある時は家族でいろいろな美術館に出かけたり、芸術作品を見に行くことが多いですね。近代美術、印象派のモネなどが好きでしたが、最近では現代アートもおもしろいと感じています。

瀬戸内国際芸術祭というトリエンナーレがあるのですが、ちょうど今年開催されていたので行ってきました。瀬戸内海の島々と港をステージにして、さまざまなオブジェや建物やインスタレーションアートがきれいな自然の中に溶け込んでいます。ただ屋外展示ということではないのです。自然環境や音も含めて、自分たちが島を巡ることによって瀬戸内海というアートの中に飛び込んで一体となったような感覚で、とても素敵でした。



OFF TIME

膜タンパク質

すべての生物の基本構成要素である細胞は、膜脂質によって外界と内部が分けられている。その膜脂質部分に存在するタンパク質の総称を膜タンパク質という。生命活動に必要な物質の運搬や、光や音などの感覚に関わるセンサーなどの重要な役割を担う。

創薬

医薬品となる化合物の設計や発見に関わる開発工程を意味する。

光で動くタンパク質

タンパク質は主に20種のアミノ酸から構成される。通常のアミノ酸に加えて、発色団と呼ばれる光を吸収する構造を含むタンパク質を光感受性タンパク質とよぶ。発色団の化学構造が変わることにより、蛍光を発する、イオンを輸送するなどの機能を持つタンパク質が知られている。

受容体

神経伝達物質や生理活性物質などのシグナル分子と選択的に結合し、機能を発揮するタンパク質。細胞膜に存在する受容体が多く知られるが、細胞質や核内に存在するものもある。



2022年7月、SACLAでの実験に参加した南後教授とメンバー。「放射光やFEL施設はいろいろなことを学べる体験の場であり、教育効果が非常に大きい。限られた実験時間のなかで、いかに有効なデータを引き出すか、日頃の鍛錬の成果が問われる」と話します。

へと送らなければなりません。「無数の微結晶を緩衝液などと共に、髪の毛よりも細い流路に流す操作が必要なのですが、流路に結晶が詰まって流れないなど最先端の実験である一方で原始的な問題も抱えています」。そのような難しさがある一方、この技術はこうした観測ができる唯一の方法のため、これからはもっと汎用性を高めていきたい、というのが南後教授の考えです。

「汎用性」を高めるために①測定時に人の手で操作する部分を自動化していく。②最初のターゲットは光で反応するタンパク質でしたが、実は光で反応するタンパク質は極稀れで、多くのタンパク質は化合物が結合して構造変化を起こしたり、化学反応を起こしたりするため、そうしたタンパク質でも分子動画を捉えることができるようにしていく。③FELに特化して実験しているが、放射光でも使えるようにしていく。「現在ではX線の強度や検出器などの向上から放射光でもミリ秒以降の動きを観測することが可能になっています。放射光施設の方がXFEL施設よりも実験する機会を多く得ることが期待できます。東北大学キャンパス内にできる次世代放射光施設なども利用して、より多くのタンパク質の動的構造解析ができるようになることを期待しています」。

新たな成果を目指して
高速分子動画プロジェクト

現在、文科省科研費助成事業の「高速分子動画」という大きなプロジェクトが進められています。「タンパク質分子の動きを原子分解能で且つ高い時間分解能で観る」ことを目的として、日本の精鋭の研究者・技術者が参加して活動を進めています。南後教授はこのプロジェクトの核となる「動画撮影基盤グループ」のグループ長であり、「時分割実験のための多様な反応誘起システムの開発」の研究代表を務めています。

あの歴史を画することとなった実験以来、再び新しい課題に向かって研究を推し進める南後教授。「継続して課題となっていることですが、光だけではなく、熱や低分子化合物などをトリガーとした反応開始技術を開発するのが狙いです。そして今まではタンパク質を結晶にしなければ解析できなかったのですが、結晶にしない溶液状態でも構造解析できるようにすることも目指しています」。

こうした技術開発には様々な研究分野からの専門家との連携が欠かせません。多くの研究者と協力して、南後教授のタンパク質の動きを解明する研究探査の道が、まだまだ続きます。



FOREFRONT REVIEW

米倉研究室は、最先端のクライオ電子顕微鏡による解析とその技術開発を進めています。単粒子解析・電子線三次元結晶解析・電子線トモグラフィーの三つの測定法について研究開発を進め、生体試料から、薬剤候補化合物、有機半導体、有機材料分子まで様々な試料の立体構造を高い精度で解明します。



「クライオ電子顕微鏡」による先端計測 生体超分子や有機化合物の 詳細な立体構造に迫る

タンパク質や有機化合物は、複雑な「立体構造」を形成して機能や特性を発現します。米倉教授が追求するのは生体分子・有機化合物の複雑な「立体構造」が生み出す作動機構や自己組織化の機構。この米倉教授の追求を支える強力なツールが「クライオ電子顕微鏡」であり、その測定手法です。

米倉研究室では、クライオ電子顕微鏡をさらに先鋭化する測定法や制御・解析プログラムを独自に開発しました。代表的な手法である「単粒子解析」では、タンパク質の分子像の画像解析から原子配置に加え水素原子が解像でき、構造変化や揺らぎを捉えた構造ダイナミクス研究も可能となります。

「電子線三次元結晶解析」では、タンパク質に留まらずいろいろな分子の極微小な結晶から得られる回折パターンを測定・解析することで、試料の構造をより詳細に明らかにできます。さらに、試料を傾斜させて像を集める「電子線トモグラフィー」によって、細胞小器官や大きく不均一な複合体の立体構造を調べることができます。

このように、クライオ電子顕微鏡では、扱える試料の形態の制限は緩く、汎用性の高い測定法といえます。生体分子や細胞小器官の自然な動作環境下での構造が得られるため、生命科学、創薬・医療応用に大きく期待されてきました。米倉研究室では、さらに薬剤、材料等の有機化合物への応用も進めています。

これまでに、光化学系タンパク質複合体、膜タンパク質、核酸結合タンパク質、ウイルスなどの生体試料から、薬剤候補化合物、有機半導体、有機材料分子まで様々な試料の立体構造を高い空間分解能で解明してきました。このような複雑な構造を持つ多様な分子の構築・機能メカニズムに迫るため、AI測定や解析などの手法開発も進めています。さらに、放射光も利用し、それぞれの線源から特徴的な情報を引き出す戦略をとります。

多元物質科学研究所
有機・生命科学部
生物分子機能計測研究分野 教授

米倉 功治

YONEKURA, Koji

1969年東京都生まれ。東京工業大学 大学院バイオサイエンス研究科 博士課程修了。1997年松下電器国際研究所 リサーチアソシエイト、1997年JST ERATOプロトニックナノマシンプロジェクト 研究員、形態変換グループ グループリーダー、2002年大阪大学大学院生命機能研究科 助手、2004年カリフォルニア大学サンフランシスコ校 (UCSF) Keck fellow、2008年理化学研究所放射光科学総合研究センター 准主任研究員、主任研究員、2018年同 放射光科学研究センター 生体機構研究グループ グループディレクター、同次世代電子顕微鏡開発連携 ユニットユニットリーダー (兼任)、2020年より現職。所属団体/顕微鏡学会(プロジェクト推進委員)、生物物理学会

<https://www.lifesci.tohoku.ac.jp/research/teacher/detail---id-45587.html>

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

試料を凍結し、低温 (cryogenic) のまま観察することでその名前がついた「クライオ電子顕微鏡」。近年急速に技術革新が進み、手法の開発に貢献した海外のバイオニアの研究者3人が2017年にノーベル化学賞を受賞しています。



独自のソフトウェア・運用技術開発により 世界最高精度の構造解析を実現

らせん状に重合するべん毛の解析で 世界が驚く4Åの分解能を達成

「生体分子などの立体構造の解明に、これまで試料の結晶化が必要でした。溶液の条件をいろいろ振り結晶化させるので、必ずしも生体内の自然な環境下の姿を反映しているわけではないのです」と米倉教授は試料調製の難しさを語ります。以前は、X線回折測定に必要とされる品質の高い結晶が得られないため研究が進まないことも多かったと言います。

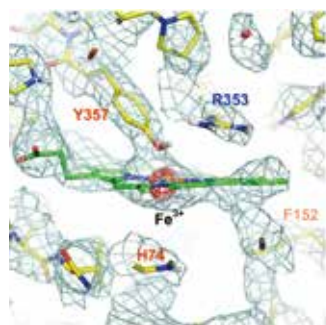
そこで注目されているのが「クライオ電子顕微鏡」による構造解析です。試料を凍結させ、液体窒素冷却下の低温 (cryogenic; クライオ) のまま電子顕微鏡

で観察します。「電子線は、X線に比べて数万から10万倍も強く試料に散乱されるため、氷中のタンパク質の一分子の像を観察できます」とクライオ電子顕微鏡の特徴を説明します。

「単粒子解析」は、得られた二次元の分子像からコンピュータでその立体構造を再構成する技術で、米倉教授の研究グループでは、様々なタンパク質の立体構造を明らかにしてきました。

「タンパク質の分子像の解析による初期の成果が、2003年に発表した細菌のべん毛繊維の構造解明でした。この解析のため、学生時代から開発を進めたらせん再構成法という手法を高度化し適用しま

した。細菌は、べん毛を高速回転させて前進し、瞬時に方向転換もします。コンフォメーションの異なる2つの構造の違いによって引き起こされる形態変換機構に



2003年、クライオ電子顕微鏡の「らせん再構成」により、べん毛繊維の形態変換機構の分子メカニズムを明らかにしました。米倉教授は30年近くクライオ電子顕微鏡を用いて研究開発を進めています。図は、カタラーゼの電子線三次元結晶構造解析。活性部位の中央にあるヘムの鉄の荷電状態に関する情報 (赤いネット) が得られた。(Yonekura et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2015).

関して、共同研究者の眞木さおりさんと共に研究を進め、その分子メカニズムを明らかにしました」。

現在のクライオ電子顕微鏡の普及を促進させた電子直接検出型のカメラの登場前にもかかわらず、4Å (1Åは100億分の1メートル) という当時の基準で、桁違いに高い分解能で原子の配置を決定しました。その結果は、世界中に大きな反響をもたらし、米倉教授は眞木研究員と共にこの業績などにより2009年にエルンスト・ルスカ賞を受賞しています。

「単粒子解析」に加えて研究開発を進めるのが、「電子線三次元結晶構造解析」で、微小で薄い結晶から電子回折を測定します。「同じ電子でも電荷を持ったものと中性のもので散乱のされ方が異なります。この特徴を活かし、タンパク質の活性部位にある金属原子の酸化状態や、アミノ酸側鎖に水素が結合しているかの判別も可能になるという成果も出ています」。

干渉性の高い電子線を採用し 世界最高の分解能を実現

「このように大きな可能性を持つクライオ電子顕微鏡ですが、その専用装置は高価な上、海外の一家に独占されている状態でした。2018年、日本電子株式会社の新しいクライオ電子顕微鏡CRYOARM 300

山登りを楽しんでいました

関東、関西、米サンフランシスコなどを生活の拠点としてきました。それぞれの場所で山に登っています。学生の頃は北アルプス、東北地方では飯豊連峰を縦走したことがあります。西日本には高い山は少ないのですが、大山、氷ノ山、雪彦山、六甲山、後山、剣山などに登りました。アメリカではヨセミテ、グランドキャニオン、ザイオン、クレータレーク、イエローストーン、シャスタ山、セドナなどを巡りました。最近、猫を飼いはじめたので山に行けません。いつか剣岳、槍ヶ岳にも登頂したいですが、険しくとても危険な岩場に躊躇しています。



西穂高独標

MY FAVORITE

TERM INFORMATION

クライオ電子顕微鏡

タンパク質などの生体分子を、水溶液中の生理的な環境に近い状態で観察し、構造解析を可能にするために開発された電子顕微鏡。試料を含む水溶液を急速凍結し、アモルファス(非晶質、ガラス状)な薄い水中に分子を閉じ込め、液体窒素(-196℃以下)を使った冷却下で観察する。冷却することで電子線の照射による試料の損傷を大幅に低減できる。液体窒素冷却下もしくはそれ以下の温度での電子顕微鏡観察や、その装置自体のこともクライオ電子顕微鏡と称する。

回折

電子線やX線が結晶性の試料に散乱され、干渉して回折を示す現象のこと。分子の並びを反映した規則的な回折点の並びなどの特徴的なパターンが観測される。

干渉性の高い電子線

エネルギーの分布の小さな電子線で、高い空間分解能まで非常に良く試料の情報を保持し、高分解能構造解析に威力を発揮する。

電子直接検出型カメラ

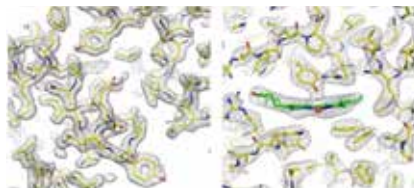
電子顕微鏡像の記録には、従来、フィルムや、放射線をあてると発光するシンチレーター層で電子線を受光するタイプの検出器が用いられてきた。2013年頃より、シンチレーターが無く素子で直接電子線を受ける、いわゆる電子直接検出型の導入が始まった。従来に比べ、隣接する画素への信号の染み出しが少なく高精細な画像が得られる。同カメラにより、クライオ電子顕微鏡像から得られる構造の分解能が格段に改善される結果に繋がった。

yoneoLocr

AI技術であるディープラーニングを利用し、試料形状やデータの質を自動判定し、電子顕微鏡を制御しながら、単粒子解析と微小結晶からの電子回折データの自動測定を実現するソフトウェア。これを用いることで、撮影の失敗がなくなり、人間の監視を必要とせず、高品質なデータの自動測定が実現できる。実時間での物体認識に定評のあるソフトウェアYOLO(You Only Look Once)をベースに開発。You Only Navigate Em (Electron microscope) Once to LOCcate in Real timeからyoneoLocrと名付けられた。
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/09/press20210917-01-EM.html>



開発したシステムParallEM (左)とそれを用いて測定した機能性材料の回折パターン(右)
(Takaba et al., J. Struct. Biol., 2020).



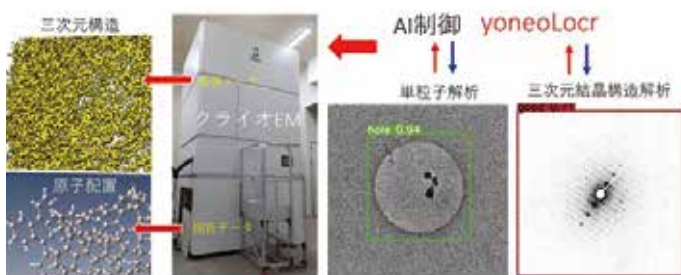
単粒子解析(左)と電子線三次元結晶構造解析(右)により得られたタンパク質の構造
(Yonekura et al., J. Structl. Biol., 2019;
Hamaguchi et al., J. Structl. Biol., 2019).

を基に、干渉性が格段に優れた電子線を発生するなどの特徴を生かし、『単粒子解析』と『電子線三次元結晶構造解析』の両方が最適な性能を発揮できるようにシステムを構築しました」と研究開発の大きな転機を生み出した当時の状況を語る米倉教授。

新しいクライオ電子顕微鏡の最大の特徴である高干渉性の電子ビームにより、従来装置に比べて、高い空間分解能で、非常に良いS/N比(信号対雑音比)を得ることができました。

「しかし、この方式の電子銃は時間とともに電子ビームが減衰するという欠点も持ちます。そこで、装置を効率良く運用するため『ParallEM』と名付けたソフトウェアを開発し、両手法による解析で世界最高品質のデータの取得に成功しました」。

生体内で鉄を貯蔵する役割を持つヒトのアポフェリチンというタンパク質の構造は、1.1Å台の非常に高い分解能で明らかになりました。タンパク質に含まれる多くの水素原子も解像できます。さらに、従来に比べて少ない数の分子像から、構造が未知のウイルスの構造決定にも成功しました。



開発したAIソフトウェア「yoneoLocr」によるクライオ電子顕微鏡のデータ測定制御の仕組み(Yonekura et al., Commun. Biol., 2021).

これらの研究成果により国産機への注目が集まり、同型機の普及が進むと共に、創薬研究への本格的な応用も始まりました。

AIによる自動測定システムの開発

進化を続けるクライオ電子顕微鏡の解析技術ですが、多数のデータを取得することが必要です。電子線をあてると試料は損傷を受けるため、一つの試料に付き一回しか撮影できません。撮影に失敗することも多く、解決すべき課題として残されていました。

「対象となる分子が含まれる視野に位置を合わせ、撮影を繰り返すのですが、撮影に数日かかることもあるので、AIによる制御を考えました。データ測定をAIで制御するソフトウェア『yoneoLocr』を開発し、人が操作する時間を短縮するとともに、撮影の失敗も大幅に減らすことができました」と米倉教授はAIによるクライオ電子顕微鏡の新たな展開を語ります。

そのために、分子の像撮影と電子回折パターン測定に必要な画像データを、ディープラーニングで機械学習させました。この学習結果に基づいて撮影を制御する一連のシステムを開発し、完全自動での測定が可能になりました。

AIによる制御システムの開発の成果について米倉教授は、「これまでの電子顕微鏡の操作には、熟練と長い作業時間が

必要でしたが、AIの活用によって、この敷居はかなり低くなりました。生命科学の分野だけでなく、材料の開発などにも役立てて行きたいと思います」と話します。

クライオ電子顕微鏡の発展に伴い、その重要性は増していくと予想されています。生命科学、医療、創薬、工学、材料科学などの分野への応用が見込まれ、広い分野の研究開発に不可欠なツールになるものと期待されます。



トロンクスの展開に向けた新たな基盤になると考えられます。

藻類の光合成の仕組み解明によりカーボンニュートラル実現へ

クライオ電子顕微鏡による複雑なタンパク質の構造解明は、さらなる展開を拓いています。藻類による光合成の仕組みの解明もその一つです。

「シアノバクテリアや紅藻、灰色藻といった藻類は、光捕集タンパク質複合体『フィコビリソーム』を用いて、太陽光エネルギーを高効率に吸収し、生命活動に利用しています。大きなポイントの一つは単一もしくは少数の発色団しかなくても、様々なスペクトルを吸収し、光化学系タンパク質へと光エネルギーを伝達できることです。この特異なシステムを明らかにするために生化学・分光学解析が行われてきましたが、フィコビリソームの分子量は非常に巨大であるため、これまでその立体構造解析には手が届きませんでした」。

これに対し米倉教授の研究グループは、クライオ電子顕微鏡を用いた解析に取り組みました。独自ソフトウェアを作製する等、撮影を高度に制御する技術開発などから、多くの高品質な画像を取得し、その

クライオ電子顕微鏡が切り拓く世界材料科学への応用も

秩序と乱れが共存する構造からより高性能な有機半導体へ

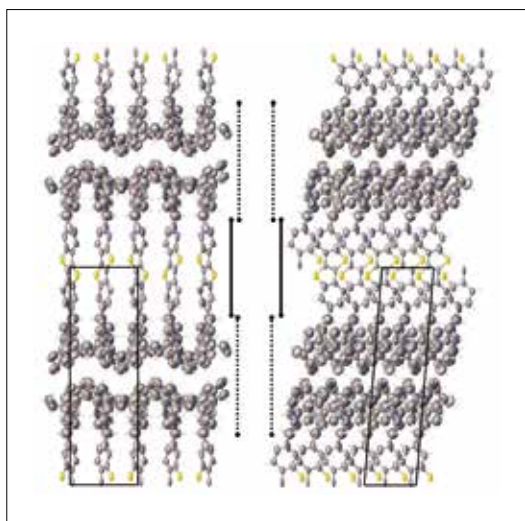
様々な試料の立体構造の解明に役立つクライオ電子顕微鏡。その応用例の一つに、電子線三次元結晶構造解析によって新たに捉えることに成功したものがああります。それは、新しい有機半導体の分子配列構造の解明です。

有機半導体は、シリコンなどの既存の無機半導体とは違い、軽い・柔らかい・塗れるという特長を持っています。この特長により電子デバイスの軽量化・ウェアラブル化や製造の省資源化が可能で、応用が期待されています。半導体として機能するためには分子の配列が重要で、原子配置を詳細に調べることが必要です。

これらの分子は薄片状の微小結晶を形成する特性を持っており、X線回折が適用できないものも多くあります。

「私たちの研究グループは、東大の長谷川研究室で設計・合成されるいろいろな有機半導体分子の構造解析を行いました。そして、得られた試料の内部で分子配列の秩序と乱れが層状に繰り返す様子を、クライオ電子顕微鏡の三次元結晶構造解析により初めて捉えることができました」。

このような構造はこれまでに知られておらず、ソフトマターエレクトロニクスの展開に向けた新たな基盤になると考えられます。



クライオ電子顕微鏡を用いた電子線三次元結晶構造解析により捉えた有機半導体の層状結晶構造。秩序と乱れが層状に繰り返すこれまで知られていなかった構造が観察された。(Inoue et al., Chem. Mater., 2022).

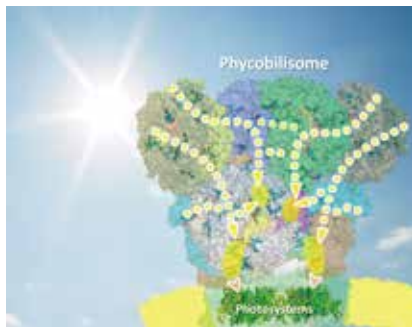
プログラミング、テレビなど

中学生の頃からPCで始めたプログラミングは、クライオ電子顕微鏡の画像処理に役立ちました。当時は自分で一から作るしかなく、いろいろ作りました。最近は時間が取れず作れませんが、特に忙しい時は今でも無性にプログラムが書きたくなります。読書、釣りなども好きなのですが時間が取れず、週末にNHKで放送しているアニメが唯一の娯楽となってしまいました。『進撃の巨人』、『キングダム』など内容がとても素晴らしく、次のシーズンが楽しみです。民放深夜の『ゴールデンカムイ』は、日露戦争後すぐの話で今の時代だから考えさせられ、興味深く視聴しています。勿論、科学番組も好きです。『笑わない数学』はとても面白いシリーズでした。

OFF TIME



『ゴールデンカムイ』の舞台、北海道、樺太を彷彿とさせる冬の日名倉山。学生時代は雪山には行きませんでした。良さが分かってきました。遭難しかけたが…



クライオ電子顕微鏡を用いた単粒子解析によって、藻類のフィコビリソームの三次元構造の解明に成功。光エネルギーを光化学系タンパク質へと効率よく伝達する仕組みが明らかになりました。(Kawakami, Hamaguchi et al., Nat. Commun., 2022)。

三次元構造の再構成に成功しました。

「川上さん、濱口さんと共に研究を進めた結果、各色素分子の周辺環境の詳細が明らかとなりました。複合体内の環境の違いによって発色団の吸収波長が変化し、一方向へ高速に光エネルギーを伝達するメカニズムを明らかにできました」。

この研究で得られた知見を、人工光合成などに応用することも考えられます。他にも光合成に関係する膜タンパク質複合体の構造がいろいろ明らかにされており、その中には反応中心の個々の原子が解像されるような高い分解能も得られています。カーボンニュートラルの実現へと発展することも期待されます。

ナノテラスとの相補利用で 広がる可能性に期待

可能性に満ちた「クライオ電子顕微鏡」。さらに展開を見せるのが、現在東北大学青葉山新キャンパスに建設中の次世代放射光施設「ナノテラス」との相補利用です。

「極めて明るい放射光(X線)を発生させ、物質や生物を観察する「巨大な顕微

鏡」です。放射光は透過力が高く、大きな試料を扱うことができます。一方、電子線は、試料との強い相互作用のため、薄い試料しか扱うことができません。両者で散乱される実態も異なるため得られる情報も異なり、相補利用が威力を発揮すると考えます。実現に向けた研究を眞木さん、高場さんと進めています」と可能性を語る米倉教授。

東北大学多元物質科学研究所では、「クライオ電子顕微鏡」を新規に大学として導入し、2022年6月から学内外に共用を開始しました。今回新たに導入した顕微鏡は、AI制御でデータを自動測定できる「yoneoLocr」を実装した装置であり、AIでデータ測定を行える世界で唯一のシステム構成です。

「この装置は、タンパク質のみならず、有機材料への応用を目指した生命系・材料系二刀流の装置であり、世界初の試みです。これにより、東北大学では硬い材料から柔らかい材料までを測定・可視化し、学術研究に限らず産業界での研究開発にも利用し、さまざまな成果を生み出すものと期待しています」。



これまで見えなかった世界を可視化するクライオ電子顕微鏡。材料研究でも大きな成果が得られる可能性があります。

TERM INFORMATION

ウェアラブル化

“Wearable”で、「着用できる」、「身に着けられる」の意。やわらかい素子の特性を活かすことで、常に身に付けて使用する等、用途が広がると考えられている。

光捕集タンパク質複合体

光合成などにエネルギーを供給するため、光エネルギーを捕集するアンテナの役割を果たすタンパク質。

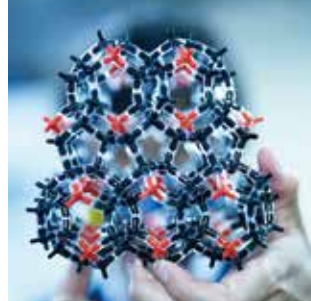
発色団

分子中で、色をつける原因となる部分。



FOREFRONT REVIEW

無機材料の多くは金属や合金、酸化物が用いられていますが、窒化物や金属間化合物も、材料として高いポテンシャルがあると言われていています。しかも3種類以上の元素で構成される多元系の無機化合物にはまだ合成されていない未知の化合物も多数存在し、既に知られている化合物でも特性や機能が十分に評価・解明されていないものがたくさんあります。山田研究室ではこうした無機化合物に着目し、新規化合物の探索や新規合成法の開発、化合物の特性や物性の評価を行うことで、新規材料の開拓を目指しています。



活性金属の可能性を探求し、 材料科学の未来を切り拓く

まだ誰も合成していない未知の化合物を見つけること。まだ誰も知らない化合物の特性や機能を明らかにすること。これらを目指して研究を行う山田教授は「研究は宝探し」と楽しげに話してくれました。その背景には、山根久典教授の研究室で助教を務めていた頃に出会った島田昌彦名誉教授(東北大学)のとある一言の影響が大きいと言います。「ナトリウムの融液を使って、高輝度LEDのデバイス材料として知られる窒化ガリウムの単結晶を育成する山根教授のプロジェクトに参加していた頃のことです。島田先生がいらしたので実験室を案内していると、“君は何の研究をしているのか”と訊ねられました」。その質問に対し、プロジェクトの内容とその合成法のおもしろさについて話をしたという山田教授。すると島田教授は表情一つ変えることなくもう一度訊ねました。「で、“君は”一体何の研究をしているのか?」。

プロジェクトのメンバーの一員として行う実験も立派な研究ではありますが、このとき山田教授は、「研究にはオリジナリティが大事」ということに気付かされました。「人と違う研究をしよう、と思うようになったのはその気付きがあったから。以来、プロジェクトで学んだナトリウムを使った合成法で様々な化合物を合成する研究に没頭していくようになりました」。そんな経緯を経て、現在主に行っているのが、ナトリウムを活用した無機化合物の新しい合成法の開発と、ナトリウムを構成元素に含む多元系金属間化合物の結晶構造や物性を明らかにしながら、機能性材料としての可能性を探求する研究です。

多元物質科学研究所
無機材料研究部門
無機固体材料科学研究分野 教授

山田 高広

YAMADA, Takahiro

1973年生まれ。兵庫県出身。京都大学大学院理学研究科修士・博士課程修了[博士(理学)]。2000年高輝度光科学研究所、SPring-8(ポストク)、2002年産業技術総合研究所 若手任期付職員、2004年東北大学多元物質科学研究所助手、2007年同助教、2008年アーヘン工科大学無機化学研究所非常勤研究員(兼任)、2010年東北大学多元物質科学研究所准教授、2021年同教授。所属団体/日本応用物理学会 日本セラミックス協会 日本熱電学会 日本物理学会 粉体粉末冶金協会。学外役職/シリサイド系半導体と関連物質研究会 委員長、日本熱電学会 理事。受賞/第47回原田研究奨励賞など

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

活性金属をフラックスとした 新規合成法の開拓

ナトリウムが持つ フラックスとしての機能性

食塩や重曹などの構成元素として身近で、地球上では6番目に豊富に存在すると言われる元素Na(ナトリウム)。その単体である活性な金属Naが、山田教授の研究の源であり舞台でもあります。「Naは反応性が高く、大気中ではすぐに酸化され、水と接触すると発火します。そのため取り扱いが難しく、最近では研究の場でもあまり使われません」。しかしその反応性の高さがおもしろいと話す山田教授。ナイフで切れるほど柔らかく、融点は98度、

沸点は883度と広い温度域で液体であり続けるNaの性質を生かすことで、フラックス(特定の物質を溶融しやすくするための物質)としての利用や、ナトリウムを構成元素として含む化合物や材料の原料として用いることができると言います。

Naフラックス法により 低温で生成する金属ケイ化物

高輝度LEDのデバイスにも用いられるGaN(窒化ガリウム)の単結晶をNa融液の中で育成するプロジェクトに参加し、様々な条件でGaNの単結晶の合成を

行っていた山田教授は、他の物質をNa融液の中で反応させて合成することはできないか考えるようになりました。「そこで注目したのがシリコンです」。

Si(シリコン)は融点が1,414度と高く、低温で金属と直接反応させるのは難しい物質です。「しかし金属NaとSiを加熱してみたところ、Siが約500度でNaに溶けることがわかりました。液体となったSiは活性が高く、多くの金属と約500-600度で反応し、シリサイド(ケイ化物)が生成します」。多くの金属とNaは反応しないため、Na-Si融液にFe(鉄)、Cr(クロム)、Mn(マンガン)などの金属粉末を入れて加熱することで、 β -FeSi₂、CrSi₂、MnSi_{1.7}といった純度の高いケイ化物を低温で合成することができます。また、この融液にNb(ニオブ)の板を入れて反応させると、表面に耐酸化性のあるNbSi₂の緻密な被膜を合成することも可能。さらに、Mo(モリブデン)のケイ化物に関しては、低温安定相(β -MoSi₂)の単相試料の合成に初めて成功し、その特性の評価も行うことができました。耐熱・耐酸化性に優れた金属ケイ化物はもともと熱電材料や高温材料などに使用されてきましたが、資源的に豊富なNaを使った合成法で高性能のシリサイドを作製することができるようになれば、それらの材料としての可能性をさらに発展させることも可能だと、山田教授は考えています。



金属Naや構成元素にNaを含む化合物の多くは大気中では不安定なため、酸素や水分を極力排除した不活性雰囲気の中で満たされた「グローブボックス」の中で取り扱い、試料の特性評価も行います。

子どもの小学校のPTA役員として頑張ってます

娘が小学校に入学してから5年間、PTA活動に携わってきました。2年目に本部役員となり、昨年には副会長を務めさせて頂いています。PTAには「面倒・難しい人がある」というネガティブなイメージがあったのですが、いざ入ってみると子どもたちと学校のことを想う気のいい人たちがばかり。ここ数年はコロナ禍で活動が制限されていますが、保護者向けのオンライン研修会の開催や広報誌の制作など、多くの行事や活動があるため、毎週のように学校に集まり、職場では出会えない様々な職種の仲間と協力しながら活動しています。

大学では「教員」という立場にありますが、PTA活動で関わらせていただく小・中学校や高校の先生は本当に素晴らしい方ばかりで、教育者として尊敬の念を抱きます。

MY FAVORITE





榎木勝徳助教が専門とする計算科学を活用することで、山田教授が合成した化合物の安定性や結晶構造の妥当性を議論したり、種々の材料特性などを予測することができます。

TERM INFORMATION

Naフラックス法

金属Naの融液をフラックス(融剤)として利用することで特定の化合物の結晶などを低温で合成する方法。有望な半導体デバイス材料であるGaN(窒化ガリウム)の単結晶がNaフラックス法によって低温低圧下で育成できることが山根久典教授によって1997年に見出され、現在も産学官の様々な研究グループによって精力的に研究が進められている。

シリサイド(金属ケイ化物)

シリコン(ケイ素)と金属元素との化合物。シリサイドの多くは融点が高く、耐火セラミックスや発熱体として工業的に利用されている。また、FeやMn、Mgなどのシリサイドは有望な熱電材料としても注目されている。

固体窒素源

尿素やメラミン、イミド化合物などの窒素を含む固体の化合物を用いて、窒化物や酸窒化物などを簡便に合成する研究が行われている。一般的な合成法では、窒素源には窒素やアンモニアガスといった気体を用いられる。

メタセシス反応

2種類の化合物の反応において、両者を構成する一部の元素や成分が入れ替わる反応。複分解反応とも呼ばれる。

固体窒素源を用いた窒化物の低温合成法の開発

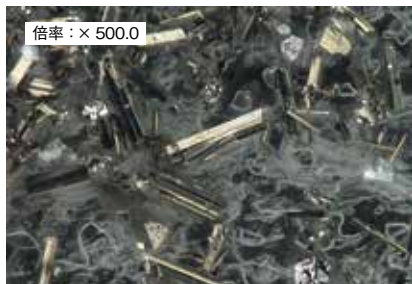
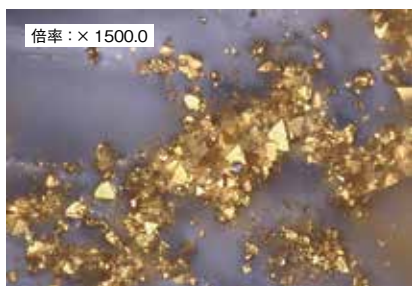
「Na-Si融液を利用したケイ化物の新しい合成プロセスは、Feのケイ化物の合成を発端として、その後、他の多くの金属ケイ化物の低温合成に展開することができました。新しい合成法を開発することは容易ではありませんが、その手法でしか得られない形態の試料や化合物が合成できたり、汎用性が高ければ様々な材料の合成に応用できたりすることが大きな魅力です。そこで現在取り組んでいるのが、Naを利用した窒化物の新しい合成法の開発です」。

特に力を入れているのが、固体の窒素源を用いた低温合成法の開発です。これは金属NaとTiO₂(酸化チタン)をBN(窒化ホウ素)のできたルツボの中に入れて約1,000度で加熱した際、TiN(窒化チタン)の単結晶粒がルツボの表面に生成しているのを見出したことがきっかけで本格的に取り組むことになったと言います。「当初はNaを含むTiの酸化物が合成されると思っていたのですが、TiO₂がルツボに用いた

BNと反応し、美しい金色のTiN単結晶粒が得られたのです。小さいながらも単結晶が生成していることに驚きました。なぜならTiNの融点は約3,000度と高く、単結晶は一般に、融点以上に加熱した融液から得られるからです。さらに、通常の窒化物の合成法では窒素やアンモニアなどの気体が窒素源に用いられますが、この反応では固体のBNが窒素源となっているのもユニークで、窒化物の簡便な合成法として応用できるのではと感じました。こうした予想もしないことが起こるのが合成実験の醍醐味だと思っています」。

では、なぜTiNの単結晶粒が生成したのか。その鍵はTiNと同時に生成する化合物Na₃BO₃(ナトリウムホウ酸塩)にありました。「Na₃BO₃はとても安定な物質で、NaとTiO₂、BNが反応することで容易に生成します。このNa₃BO₃の生成に伴って、TiO₂の酸素とBNの窒素が交換される一種のメタセシス反応が起こり、TiNが生成したと考えています。Na₃BO₃は融点が約640度と低く、TiN結晶粒が生成した温度では液相として存在しています。この液相が低温でのTiN単結晶粒の生成に深く関与していると思っています」。

山田教授は他のいくつかの金属酸化物でも同様の反応で窒化物の単結晶粒が生成することを見出しています。そして、現在は、合成する金属窒化物の種類をさらに増やし、それらの結晶をより大きくすることで、単結晶の特性を評価し、材料として活用することを目指しています。また、BN以外の固体の窒素源の探索など、この新しい合成手法を改良・発展させることにも注力しています。



固体の窒素源を用いた新しい合成法により、約1,000度の加熱で、高融点の金属窒化物の単結晶粒(上:TiN, 下:ε-TaN)を生成することに成功。これらの結晶は工学分野で使用される材料になりうるもので、さらに大きな結晶を得ることを目標としています。

熱電材料に適した 低熱伝導性のジントル化合物

半導体的特性を持つ 金属間化合物の再評価

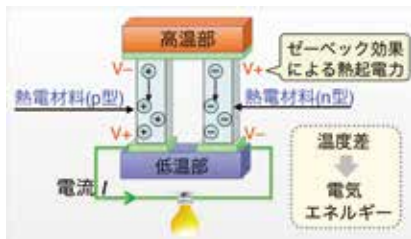
Naを構成元素に含む金属間化合物は、まだ合成されていない化合物や、既知の化合物であっても基礎的な電気特性すら明らかになっていないものが数多く存在します。「例えばNaとMg(マグネシウム)、Sn(スズ)といった、よく知られた3つの金属元素で構成される化合物の報告はありませんでした。そこで、実際に合成を試みると、少なくとも3つの化合物が存在することが分かりました」と山田教授は話してくれました。一方これらは大気中で不安定

なため、評価や測定が難しい物質でもありました。「不活性ガスの中で評価できるよういろいろ工夫しましたよ。グローブボックスに改良を重ねた治具や測定装置を導入することで結晶構造や熱・電気的特性などを明らかにすることができました。そうした研究の過程で、Naを含む金属間化合物には熱電材料に適しているものが多いことに気がきました」。特に山田教授が目にしたのは、Naを含む金属間化合物は共有結合性に加えてイオン結合性も有していることと、複雑な結晶構造を持つことでした。「塩や酸化物の多くはイオン結合

性が強く、あまり電気を流しません。一方、金属や合金はいわゆる金属結合によって電気をよく流します。Naを含む金属間化合物は、丁度これらの中間の性質を示す傾向があり、半導体的な特性を有するものが多いのが特徴です。こうした物質群は“ジントル化合物”とも呼ばれています」。

熱電材料は熱エネルギー(温度差)と電気エネルギーを直接変換することができる材料で、捨てられている熱から電気を発生させる廃熱発電や、その逆の電気を流すことで材料に温度差が生じる効果を利用したペルチェ冷却への応用が可能です。熱電材料による廃熱発電は、石油や石炭などの一次エネルギーのうち、約65%が熱として捨てられている日本や世界各国が抱えるエネルギー問題を解決するものとして期待されています。現在は1950年代に開発されたBi₂Te₃(ビスマステルル)をもとにした材料が実用的な熱電材料として使用されていますが、社会に普及するためにはより高性能かつ、安価で安全な新規材料の開拓が望まれます。「熱電材料の性能は、その材料の持つ熱電能(1℃の温度差で発生する熱起電力)、電気伝導率(電気の流れやすさ)、熱伝導率(熱の流れやすさ)から算出することができます。熱電材料に生じた温度差に比例して発生する電圧(熱起電力)を利用して発電します。乾電池に例えると理解しやすく、大きな電圧を発生しながらも電流をよく流す熱電材料が必要です。ただし、熱電材料そのものが熱をよく流してしまうと、肝心の温度差が材料に付きにくくなるため高い熱起電力を得ることができません。そのため、熱電材料には、熱電

熱電発電の原理



熱電材料の両端に温度差が生じるとゼーベック効果により、熱起電力が発生します。上図のようにキャリア極性が異なる熱電材料を直列につないだ回路では、温度差を電気エネルギーに効率的に変換することができます。

熱電材料の性能

無次元性能指数, ZT: 実用材料の目安は1以上の値

$$ZT = \frac{S^2 \times \sigma}{K_C + K_L}$$

S: 熱電能(ゼーベック係数)
 σ: 電気伝導率
 K_C: 熱伝導率(キャリア成分)
 K_L: 熱伝導率(格子成分)
 T: 温度

トレードオフの関係
 独立した物理量

熱電材料の性能(ZT値)は、熱電能が大きくて電気を流しやすく、熱を伝えにくいものほど高くなります。しかしながら、物質には、電流をよく流す(σが高い)ものほど熱電能(S)は小さくなり、電子などが伝える熱が増えることで熱伝導率(キャリアの熱伝導率K_C)は大きくなる物理的な相関関係があります。これらのパラメータ(σ, S, K_C)を個別に調整することが難しいため、化合物自身の熱伝導率(格子の熱伝導率K_L)を低く抑えることが重要になります。

娘の成長を感じながら、限りある時間を大切に過ごす日々

休日は娘と過ごす時間を大切にしています。やがて思春期を迎えたら、これまでのように接してはくれなくなると思うので、少しでも長く一緒にいたいなと思ひました。土曜日の午前中は娘の学校でPTA活動をして、授業を終えた娘と一緒に帰宅したのち、簡単なお昼ご飯を食べてもらって、習い事の送迎をする、というのがお決まりのルーティンですね。娘に請われ、市民図書館に本を借りに行ったり、トランプをしたりすることも、今だけの特典だと思って、楽しみながら付き合ってもらっています。以前は研究所から自宅までが遠かったので帰りも遅く、家族とはすれ違いの生活をしていましたが、最近、引っ越しをして自宅での時間を増やすようにしています。



OFF TIME

TERM INFORMATION

金属間化合物

2種類以上の金属元素、または金属元素と非金属元素で構成される化合物。合金とは異なり、構成元素が一定の規則性を持つ結晶構造を有し、組成は簡単な整数比で表されるものが多い。

Bi_2Te_3 (ピスマス・テルル)

Bi(ピスマス)とTe(テルル)から構成される化合物で、室温を含む比較的低い温度域で利用される熱電材料の母物質。実際の材料にはSb(アンチモン)など様々な元素が置換された化合物が用いられている。

熱電能 (ゼーベック係数)

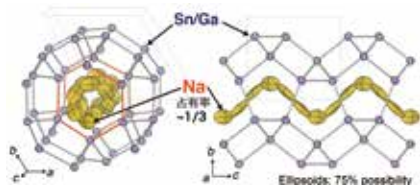
物質の両端に温度差をつけると電圧(熱起電力)が生じる現象はゼーベック効果と呼ばれる。この現象における熱起電力の大きさは温度差に比例し、その比例係数(単位温度差あたりの熱起電力)が熱電能(ゼーベック係数)である。熱起電力の極性は物質によって異なるため、熱電能の値は正と負がある。

クラスレート化合物・ スクッテルダイト化合物

熱電材料としての応用が期待されている金属間化合物の一種で、結晶構造はカゴ状の骨格構造を構成するホスト原子と、その中のカゴ状の大きな空間に配置するゲスト原子で構成される。ゲスト原子の大きな熱振動状態(ラットリング)が、熱を運ぶフォノンを散乱し、化合物自身の熱伝導率(格子の熱伝導率)を著しく低減していると考えられている。

ジントル化合物(ジントル相)

電気陰性度の差が大きな2種類以上の元素の組み合わせで構成される金属間化合物の呼称で、この物質群を詳細に研究したドイツの化学者Eduard Zintlの名前に因む。ジントル化合物の多くは半導体的な電子構造を有し、イオン結合と共有結合が共存する多様な結晶構造を持つ。高い熱電特性を示す化合物が多く報告されている。



Snを主成分とした螺旋状のトンネル空間を有するジントル化合物の結晶構造。トンネル空間に配置するNa原子はトンネルの伸長方向に大きく熱振動(ラットリング)しており、化合物の熱伝導率を低減させる主要因であると考えられます。

能が大きくて電気をよく流し、熱を伝えにくい物質が求められます」。

トンネル構造とNaが 高性能な熱電材料の鍵に

化合物自体の熱伝導率(格子の熱伝導率)が低く、高い熱電特性を示す化合物として注目されているのが、かご状の骨格構造を持つクラスレート化合物やスクッテルダイト化合物と呼ばれる金属間化合物です。「結晶構造内のかご状の大きな空間(隙間)に配置した原子が、その中で大きく熱振動(ラットリング)することによって、熱を伝えにくくすると言われています。私は、それらと異なる形状の空間を結晶構造内に有した化合物でも、同様な機構で低い熱伝導率が実現し、高性能な熱電材料の新たな候補物質になるのではと考えました」。

この着眼点から山田教授が合成したNaとGa、Snで構成される金属間化合物(ジントル化合物)は、その結晶構造の中に螺旋状のトンネル空間があり、その中にNa原子が配置していました。「このジントル化合物は1996年にアメリカの研究者らによって発見されていた物質ですが、材料としての



化合物の合成は様々な装置や条件下で、これまでの経験や知識をもとに試行錯誤しながら行われます。計算によりある程度の効率化が図れますが、その計算も含め、実際の研究は人が行います。スタッフや学生と協力し、支え合うことで良い研究成果が得られると思っています。

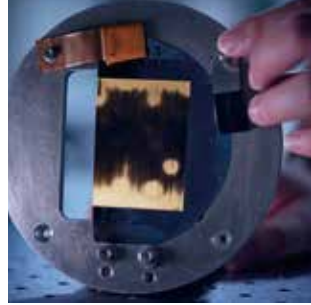


特性評価はもちろん、どれくらい電気を流しやすい物質であるかさえ知られていませんでした」。山田教授はこの化合物のトンネルの中に配置するNa原子が大きく熱振動していることを明らかにし、実際にガラス並みに低い熱伝導率を示すことを確認。「クラスレート化合物では、かご状の空間の中で孤立した原子が三次元的に振動しますが、トンネル構造を有する化合物では、Naは互いに近接してトンネルの伸長方向に大きく振動しています。こうしたラットリングする原子の環境の違いが熱伝導率に及ぼす影響にも注目しています」。このNaの異常に大きな振幅振動が低い熱伝導率の起源だと確信した山田教授は、Naを含んだトンネル構造を有する金属間化合物を、新規化合物も含めていくつも合成し、それらの熱電特性の評価を進めています。そして、いずれの化合物も低い熱伝導率を示すこと、さらに一部の化合物は実用材料である Bi_2Te_3 に匹敵する性能を持つことが分かってきたと言います。「トンネル構造を持つ化合物が最初に発見されたときは、熱伝導率が低くて熱電材料に適しているという着想はなかったかもしれません。その当時は「役に立ちそうにない」として評価されなかった物質も、時代が進んで違った視点で改めて評価することで材料として大きな可能性を秘めていることが明らかになる。こうしたことを体験することができました。それと同時に、これまでに膨大な数の化合物を合成し、報告してきた先人の研究者に敬意と感謝を感じずにはられません。近年、Naをはじめとする反応性の高い元素や、Pbなどの毒性が高いとされる元素は、様々な研究の対象から除外されがちなのですが、それらを含んだ数多くの化合物の中にも科学的な『宝物』がたくさん存在していると思っています。そうした視点で、まだ誰も知らない物質を合成し、それらの特性を明らかにする研究におもしろさややりがいを感じています。また、例え合成された新規化合物がその時点では役に立つか立たないか分からなくても、きちんと結晶構造や特性を明らかにし、記録として後世に残していくことも大学で行うべき大切な研究だと実感しています」。

FOREFRONT REVIEW

私たちが生きる「三次元（3D）+時間」という「4Dの世界」には、最先端の計測テクノロジーでも見ることできていない可能性に満ちた未知の領域が広がっています。矢代研究室では、X線などの高エネルギービームの量子性、先端的なマイクロ・ナノファブリケーション技術、データサイエンス技術などを駆使した従来の限界を超えるイメージング技術を開発し、未開の4D世界に挑んでいます。





誰も見たことのないミリ秒の4D世界を 世界最速のX線CT技術で〈見る〉

「我々は4Dの世界に生きている」。

この4Dの世界をミリ秒オーダーで、対象を壊さず、生きたままに、動的な振る舞いを見ることはできないか。これは、世界中で計測に関わる研究者が長年追求し続けてきた問題です。

「一期一会のリアル系」と矢代教授が呼ぶこのマイクロメートル以下かつミリ秒以下の4D時空間領域には、可能性に満ちた未知の高速現象が存在すると考えられます。矢代教授は、これまでX線イメージング法の高感度化に取り組んできました。さらに、この一期一会の現象をはっきり捉えるために、イメージング技術の「高速化」を追求しています。しかし、対象を高速回転させるという発想では限界がありました。

計測技術を創意工夫することで、X線などの高エネルギービームの量子性と、先端的なマイクロ・ナノファブリケーション技術、データサイエンス技術の三位一体により、ついにミリ秒オーダーの時間分解能の超高速・高感度4D（空間座標+時間座標）X線トモグラフィを実現しました。

まさに、世界初の成果となる矢代研究室が開発した技術は、近い将来に汎用性の高い手法に発展すると予想され、ソフトマター科学やバイオメティクスなどの基礎・応用研究分野におけるフロンティアの開拓など、我が国が世界を牽引する多くの分野への波及効果が期待されています。

さらに矢代研究室では、X線イメージングにより試料内部の弾性率の分布を高空間分解能で可視化する技術の開発を行っています。このX線エラストグラフィ技術は、医療診断や機能性ソフトマテリアル研究への応用などが期待されています。

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
量子フロンティア計測研究分野 教授

矢代 航

YASHIRO, Wataru

1972年埼玉県生まれ。東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程 修了。2000年日本学術振興会 特別研究員(PD)、2004年東京大学大学院新領域創成科学研究科 助手(助教)、2012年東北大学多元物質科学研究所 准教授、2020年京都大学 客員准教授(兼任)、2021年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、東北大学多元物質科学研究所 教授(兼任)、2022年東京大学 特定客員教授(兼任)。所属団体／応用物理学会、日本物理学会、日本放射光学会、日本光学会、日本顕微鏡学会、日本表面真空学会、日本高分子学会、Optical Society of Americaなど。受賞／2020年日本光学会 光設計優秀賞、2021年応用物理学会 光・量子エレクトロニクス業績賞(宅間宏賞)など。

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

ミリ秒の「生きた世界」を見る 世界最高速の4D-CT技術

タイヤの破片による汚染問題 解決のカギは破壊の瞬間の リアルタイム観察

「現在、世界中でプラスチックによる海洋汚染が問題になっています。その約3割がタイヤゴムに起因しているという調査結果が出ています。走る際に発生するタイヤの微細な摩耗片が海に流れているのです」と現代社会の環境問題を話す矢代教授。摩耗しにくいタイヤをつくるためには、タイヤに関する情報が必要になりますが、走っているタイヤの、つまり「三次元(3D)+



従来の大学での研究は理想系の静的状態を一つひとつ計測するものでした。それに対し矢代研究室では、実材料系(リアル系)の一期一会の破壊現象などのビックデータをリアルタイムでそのまま取得する方法を開発しています。

時間」という生きた「4D」の情報を得る方法がなかったと言います。

「タイヤのゴムはいろいろな組成からなる複雑な材料です。走っているタイヤの破壊・摩耗などのメカニズムを解明するためには、実際に高速で運動している時の一期一会のビッグデータが必要になります」。

そこでゴムに関する様々な知見を持つ住友ゴム工業株式会社と共同研究を開始しました。道筋となったのが、矢代教授が従来から先駆的に開発を進めてきたX線によるイメージング法でした。一般に知られている病院のX線CTの撮影時間は数秒～数10秒のオーダーですが、強力な放射光を用いるとミリ秒オーダーの時間分解能で試料内部を三次元的に可視化できることが分かってきています。「しかし、強力な放射光を用いて、多くの方向から試料を撮影する必要があるため、試料を高速に回転する必要があります。1ミリ秒時間分解能の実現のためには、1分間に3万回転という高速の回転が求められます。生物を始め、流動性のある試料や生体試料に対してはとても現実的ではありません」。

では、どうするか。「対象を回転できないのであれば、こちらの光源を変えるしかない」。矢代教授は、この物理的な問題をブレークスルーする新しい発想を生み出しました。

マルチビームで試料を回転せずに ミリ秒4D トモグラフィを実現

試料を回転させるのではなく、光源(放射光)をマルチビーム化するという逆転の発想、すなわち、方向の異なる多数のビームを当てることにより、試料を回転させた時と同じ効果が得られるというわけです。

「放射光をマルチビーム化するための方法として、最初に浮かぶのがたくさんの鏡のようなもので反射させる方法です。しかし、透過力の高いX線は可視光の鏡による反射のように伝播方向を容易に制御することができません。そこで、薄い板状(ブレード状)のSi単結晶を微細加工により作製し、多数のSi単結晶ブレードの支持部を双曲柱ホルダーに沿って固定し、X線ビームを回折させました」と、実現させた方法を説明する矢代教授。

さらに、双曲柱ホルダーを三段に配置しました。後段になるほど双曲柱の曲率を上げて回折角度を大きくすることにより、 $\pm 70^\circ$ の投影方向をカバーするマルチビーム光学系の開発に成功しました。

「原理実証実験は大型放射光施設SPring-8で行いました。放射光マルチビー

チューバという楽器です

中学生時代から、吹奏楽部、オーケストラなどでチューバという金管楽器を吹いていました。5年ほど前に10年ぶりに演奏会に出たのですが、まだ音が鳴りました(笑)。意外と思われるかもしれませんが、高音域に魅力のある楽器で、マーラーの交響曲から映画「ジョーズ」のテーマ曲まで、意外なところでソロで活躍しています。ぜひ(私ではなく)プロの生の音を聴いてみてくださいね。

MY FAVORITE



TERM INFORMATION

放射光

「シンクロtron放射光」とも呼ばれる。ほとんど光の速さで運動する電子の進行方向が変えられた際に生じる光のことで、実験室で得られるよりも桁違いに強力なX線ビームとして利用できる。大型放射光施設「Spring-8」や、3 GeV放射光施設「ナノテラス」は、そのような放射光を発生する施設の名称である。

高エネルギービームの量子性

病院のX線CTなどで使用されている高エネルギーのX線ビームなどは、波のような性質だけでなく粒子のような性質（量子性）を合わせ持つ不思議なふるまいをすることが知られています。例えばX線の波のような性質をうまく利用して物質と相互作用させ、粒子として検出することで、高感度X線イメージングなど、様々な計測方法が実現できます。

マイクロ・ナノファブリケーション技術

コンピュータ内で用いられている半導体デバイスや、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) デバイスと呼ばれる機械要素部品などを集積したデバイスでは、リソグラフィなどの技術により、ナノメートルからマイクロメートルスケールで物質の構造を制御する微細加工技術（マイクロ・ナノファブリケーション技術）が使用されています。

マルチブレード単結晶

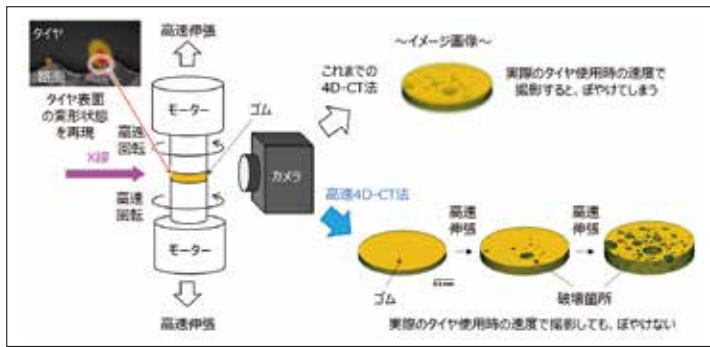
矢代教授が独自に開発した、X線のブラッグ反射を用いた光学素子で、微細加工技術により、薄い単結晶Si (シリコン) の板 (ブレード) を多数配置した構造になっている。下の支持部を湾曲することで、ブレードが様々な方向を向き、それぞれ異なる方向にX線を反射することで、放射光のマルチビーム化が実現された。

圧縮センシング

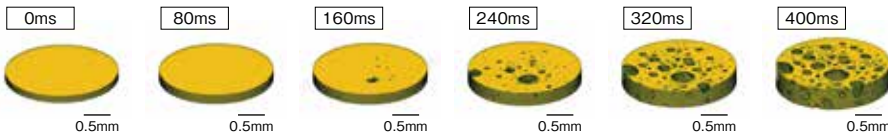
画像などのデータに内在する疎性 (スパース性) を利用して、計測そのものを圧縮する方法。データ圧縮においては、データに対して適当な変換を施すことにより、本質的に重要な情報 (一般にはスパース) のみを保存する方法が知られているが、圧縮センシングでは、計測・解析法をうまく設計し、最小限の計測から本質的に重要な情報のみを抽出する。

バイオメテックス

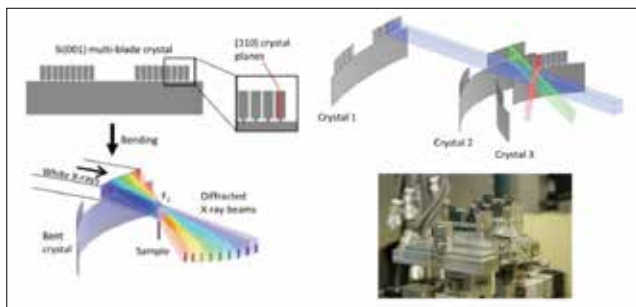
「生物模倣工学」などと訳される。長い時間をかけて進化 (最適化) された生物をまねて、ものづくりなどに応用する学術分野。ヤモリテープやモスアイ構造 (蛾の目を模倣した反射防止構造) などが有名であるが、従来は静的な構造に着目した研究が主であった。矢代教授が開発した4D-CT技術は、動的バイオメテックスへの応用の観点からも期待されている。



ミリ秒オーダー時間分解能の4D-CTの概念図。矢代教授によるミリ秒オーダー時間分解能の4D-CTは、世界から注目を集めました。



タイヤゴムの引張破壊過程のリアルタイム4DX線CT観察の例 (時間分解能: 10ミリ秒)。



矢代教授は微細加工によりマルチブレード単結晶を作製、この光学素子により放射光をマルチビーム化させることに成功し、試料回転なしで1ミリ秒時間分解能のX線CTが実現できることを実証しました。

ム化技術により32方向からの投影像を1ミリ秒で取得できました。そして圧縮センシングに基づくアルゴリズムを用いて、三次元画像を再構成しました」。

ミリ秒オーダー時間分解能の4D-CT技術の完成です。この実験結果は、世界初の成果として大きな注目を集めました。マルチビーム化により、1ミリ秒の撮影時間で三次元再構成ができることを実証したわけです。

「これにより実際にタイヤが摩耗する時に近い状態で3D観察することが可能となりました。今後この技術を活用し、耐摩耗性能に優れた環境に優しいタイヤの新材料開発につなげていければと考えています」。

広がるマルチビームの応用

「高速回転させずに、生きたそのままでの動的三次元観察ができるわけですから、今後様々な試料への適用ができると期待されています」と4D-CTの可能性を語る矢代教授。ひとつには生命や物質科学を始めとする広範な学術・研究分野での応用展開が、さらには産業界における材料・製品開発、ひいては技術革新・新価値創造を

推進する原動力にもなり得ると言います。

「例えば、昆虫の4D-CTでの観察が目まぐるしく見えています。なぜ昆虫が面白いのか。それは、生物の動的な機能を観察・分析し、そこから着想を得て新しいものづくりに活かすバイオメテックス技術 (生物模倣工学) にも応用できるからです」。

このバイオメテックス技術の領域では、例えばヤモリの足の裏にヒントを得た接着テープなどが有名ですが、従来は静的な構造から着想を得る研究が主でした。4D-CT技術を使えば動的な仕組みを直接観察できます。蚊が血を吸うポンプの仕組みや、アリの歩行、トンボの飛翔などをリアルタイムで観察できれば、新たな知見を得ることが可能となり、今までにないデバイスを創りあげることも可能となります。

「生物以外にも、ドリルの穴あけなど精密加工装置の加工プロセスを観察することができ、加工装置の進化につなげることができるはず。機械加工をロボットが代行する時代になっていますが、そのリアルな瞬間を見ることにより、職人技に迫る高度な技術を実現していくことも可能になります」。

硬さ・柔らかさを〈見る〉 X線エラストグラフィの開発

病変は「硬く」なる 硬さを可視化できないか？

高度化していくX線のイメージング技術の中、矢代研究室では、さらに新しい分野での応用を考えています。そのひとつが、医療の分野です。

「腫瘍や肝硬変・動脈硬化など、多くの病変は正常時よりも硬くなることが知られています。医者や触診もこの硬さの変化を調べているわけで、現在でも乳がん検査などで用いられています。しかし、この触診では残念ながら深部にある病変や小さな病変を見つけることは困難です」と語る矢代教授。この病変による硬化を



矢代研究室では2017年から、病変の診断能向上のため高空間分解能を特長とするX線イメージングに注目し、X線イメージングを用いたエラストグラフィ(X線エラストグラフィ)に関する基礎的研究を開始しています。

「見る」ことができれば、医療の現場での活用性が飛躍的に高まります。この硬さを可視化する仕組みとして最新のX線によるイメージング技術を活かせないか、と矢代教授は考えました。

「1990年代に入って、超音波(US)や磁気共鳴(MR)を利用して硬さを画像化する方法が提案されています。『エラストグラフィ』と呼ばれる手法で、病院等で用いられているのですが、我々はこの『エラストグラフィ』という技術に着目しました」。

現在臨床で使用されている超音波エラストグラフィ、磁気共鳴エラストグラフィは、その原理により「静的エラストグラフィ」(ひずみの分布とモデルから硬さを計測するもの)と「動的エラストグラフィ」(せん断波の伝搬速度を利用して硬さを計測するもの)に大別されます。

「ただ、一般的な医療診断機器での空間分解能はミリメートル前後に留まっており、高精細な硬さ分布の可視化は困難でした。そこで我々は、現在病院で用いられているエラストグラフィの空間分解能を大きく向上したいと考えました」。

X線エラストグラフィの開発

「X線を用いたエラストグラフィの先行研究は、サンプルへ静的な応力を与えてその時の内部のひずみを評価した報告がありますが、弾性率マップの取得には至っていません」と語る矢代教授。

X線イメージングは、超音波診断、磁気共鳴イメージング(MRI)に比べて、はるかに高い空間分解能が実現できることが特長です。しかしながら、X線イメージングにより、どのように硬さを数値化し、イメージ化させるか。矢代研究室では外部から連続的に振動を与え、サンプル内部にずり弾性波を発生させることにより、ずり(ずれ、剪断)弾性率を測定する「動的エラストグラフィ」に着目し、弾性率画像を取得することを目指しました。

「まず、試料に一定周波数の音響波を与え、音響波の周波数と同期させてX線イメージングを行ないます。これにより音響波の伝播に伴う試料内のわずかな変位の分布(変位マップ)を求めました」。

医療の現場で活用されるために、実験室レベルの強度の弱いX線源で実験を行いました。その結果、レントゲン撮像に代表されるX線イメージング技術を用いて、50 μm 程度の空間分解能で硬さの分布を可視化することに成功し、世界で初めて三次元的な硬さマップを求めることも原理的に可能であることが示されました。

「既存のCTスキャナなどに安価に組み込むことも可能であることがわかりました。画質(S/N比、アーティファクト除去)については今後さらに改善する余地がありますが、病変部位の早期発見や疾患の機序解明、治療に関する知見などを得るこ

家族との時間を大切にしています

毎日の夕食後、休日に家族(妻、息子)と過ごす時間を大切にしています。恐竜の知識、ピアノではすでに6歳の息子にかないません(笑)。先日はピアノ連弾で、「パパと相性悪いねー」と言われました(苦笑)。ちなみに、最近テレビ番組や新聞などでよくご紹介いただいているX線投影像の試料(サクランボ)は、妻が放射光実験にいちばん適したものをみつけてくれました。当たり前のような日常ですが、私にとってはすべてが奇跡です。



OFF TIME

TERM INFORMATION

エラストグラフィ

試料内部の「硬さ」(様々な弾性率)を可視化する方法。超音波診断、磁気共鳴イメージング(MRI)などでは1990年代から開発が進められ、現在では臨床現場で医療診断に利用されている。試料内のひずみ分布と構造モデルから弾性率を求める静的エラストグラフィと、試料内を伝播するずり弾性波を利用する動的エラストグラフィに主に分けられる。

ずり弾性波

試料がずり変形するとずり応力が発生する。これらの比はずり弾性率(剛性率)と呼ばれる。試料に振動を加えると、ずり弾性率に起因する応力が復元力となって、試料内を波が伝播する。この波をずり弾性波という。ずり弾性波の伝播速度から複素弾性率をモデルフリーに求めることができ、この方法は「動的エラストグラフィ」と呼ばれている。

貯蔵弾性率

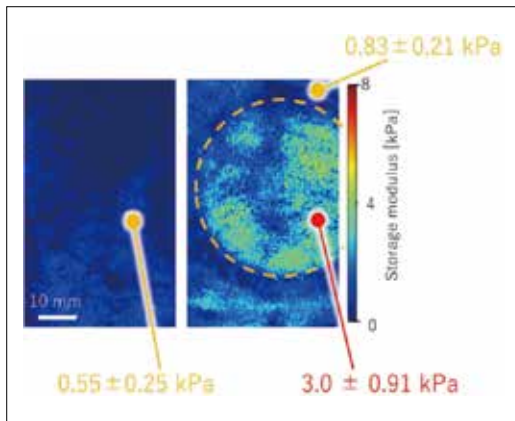
粘弾性体の試料に一定周波数で力を加えるとずり弾性波が生じるが、ずり弾性波の伝播は、ラブラシアンと時間に関する二回微分を含む一般的な波動方程式で近似できる。両辺をフーリエ変換して比を取ることで、複素弾性率が定義される。複素弾性率の実数部は貯蔵弾性率、虚数部は損失弾性率と呼ばれる。

S/N比

Signal-to-noise ratioの訳。ノイズに対するシグナルの割合。S/N比が高いほど良好な画像である。ノイズとしてはよくランダムノイズ(誤差)が用いられる。一方で、特定の原因によって生じる系統的な誤差もあり、そのような計測そのものやシグナル処理などの過程で生じる系統的なシグナルのゆがみはアーティファクトと呼ばれる。

新たなモダリティ

モダリティという用語は、特に医療分野において用いられてきた言葉で、医療診断法のタイプなどを表す。例えば、「X線CT、MRI、超音波診断などのモダリティによる診断(マルチモダリティ診断)」などのように使用される。近年は、医療分野だけでなく、一般的な計測に対しても広く用いられるようになりつつある(「マルチモーダル計測」など)。



新しいX線エラストグラフィによって求められた硬さ(貯蔵弾性率)マップ。硬い領域(破線内)がある右の試料では、その周りの領域との濃度差はわずかで、通常のレントゲン撮影では識別することができませんが、硬さマップでははっきり識別できているのが分かります。

し、今まで見えなかった世界を見ることに挑戦しています」。

現在、東北大学青葉山新キャンパスに建設中の3 GeV放射光施設「ナノテラス」に対しても、

2024年度からの本格運用に向けて、矢代教授は準備を進めています。

「このナノテラスは、新しい挑戦の舞台でもあります。この施設では、国内最高性能を誇る大型放射光施設『SPring-8』(兵庫県)よりも明るい放射光が利用できます。現在我々が開発した4D-CT技術は、ミリ秒オーダーの時間分解能を達成していますが、このナノテラス施設を利用することで、0.1ミリ秒オーダーが狙えると期待されます。4D-CT技術の最前線の、さらにその先をゆく研究に取り組んでいきたいですね」と、矢代研究室の三次元+時間、一期一会のリアルな世界への飽くなき挑戦は続いています。



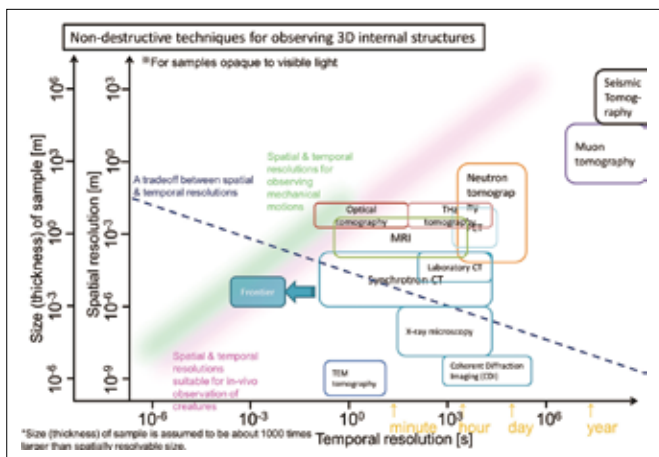
X線による表面・界面構造解析と先端的なX線干渉計によるX線イメージング技術の融合や、量子現象を利用した新たなモダリティの開拓にも挑戦しています。

とができると期待されます。さらに機能性ソフトマテリアル研究への応用など、様々な波及効果も考えられます」。

4D-CT技術の最前線の その先をゆく研究に取り組む

矢代研究室が挑む時間分解能ミリ秒オーダー、空間分解能数10 μ mの領域はこれまで未開拓ゾーン。「いまだ誰も達成していない4D-CT可視化の空白地帯をターゲットとしています」と矢代教授は語ります。このゾーンは、学術・産業応用上、極めて重要だと言います。

「我々はこの未知の領域に挑むために、先端的なマイクロ・ナノファブリケーション技術により、従来の限界を超えるX線イメージングを実現するための光学素子の開発を行っています。さらに新たなX線イメージング法の開発にも取り組んでいます。X線による表面・界面構造解析と、先端的なX線干渉計によるX線イメージング技術の融合により、表面・界面の構造パラメータの空間分布を可視化するなど、量子現象を利用した新たなモダリティを開拓



様々な計測方法の時間分解能・空間分解能のマップング図。矢代研究室では、未だ誰も達成していない4D-CT可視化の空白地帯をターゲットとしています(ピンクおよび緑のゾーンはノイズに対応)。

FOREFRONT REVIEW

高機能を発現するナノ粒子を有機分子や高分子と複合化すると、時空間のスケールに応じた興味深い現象が生じます。こうしたナノ複合材料が、なぜ特異な構造と機能を発現するのか。そのしくみを理解することは、新たな複合材料の開発に必要不可欠です。西堀研究室ではハイブリッドナノ材料の構造と機能の相関を正しく理解するために、構造形成過程や熱・光・応力などで変化した原子の化学状態を、高輝度放射光X線を用いて可視化し、新奇な機能を担う新原理の発見を目指します。





放射光計測を駆使し 材料科学の未知の世界へ

超高温高压な地球深部では一体何が起きているのか、地球を構成する物質の性質を知りたい。それが当時大学院生だった研究者の科学的探究心でした。折りしも、大型放射光施設SPring-8が誕生し、強力なX線を用いた地球深部条件でのその場観察が実現します。運が良いことに、SPring-8でのこけら落としの実験が、指導教授をリーダーとする研究グループによって行われました。マントルを構成する主要鉱物であるカンラン石が24万気圧、2,000°Cという高温高压下で構造変化する様子を世界で初めて直接観察した成果でした。

世界初の発見に至るまで、研究者や技術者、学生が皆同じ土俵で計測データに向き合い、その熱気、興奮、高揚感を体感。そのまま放射光施設に留まり博士の学位を取得した研究者は、生活や社会の中で役立つような物質の構造と性質を探ってみたいと考えるに至り、材料科学の応用研究と社会実装に取り組む産業技術総合研究所に移ります。

当時、水素を安全に利用するための技術が社会的な重要課題となっていました。そこでセラミックスなど機能性材料の物性研究を活用したガスセンシング技術の開発に力を尽くします。厳しい品質保証に対応すべく研究開発を続けていく中で、こう考えるようになりました。技術シーズから開発ステージの間に存在する「魔の川」、開発段階と事業化を隔てる「死の谷」、それぞれを乗り越えるためには材料科学の本質を理解し見極める必要がある。そのための放射光だ、と。

やがて、研究者は九州大学シンクロtron光利用研究センター 准教授を経て、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 (SRIS) の教授 (多元物質科学研究所 教授兼任) となります。「自分がひとりの研究者としてどのような科学を探求したいのか、その思いに惹かれるがまま決断を下していたと思います」。あれから25年を経て、今また次世代放射光施設の立ち上げに臨もうとしている西堀麻衣子教授。「生涯に二度はないと思っていただけに、不思議な縁を感じます。何が嬉しいかという、若い研究者と学生に科学の醍醐味を身近で感じてもらえること」と感慨深く話します。

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
有機・生命科学研究部門
高分子ハイブリッドナノ材料研究分野 教授

西堀 麻衣子

NISHIBORI, Maiko

愛媛県生まれ。愛媛大学 大学院理工学研究科 博士課程 (理学) 修了。1988年 財団法人高輝度光科学研究センター、2004年 独立行政法人産業技術総合研究所、2011年7月 九州大学シンクロtron光利用研究センター 准教授、2012年4月 九州大学 大学院総合理工学研究院 准教授、2021年3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、同4月 東北大学 多元物質科学研究所 教授 (兼任)、九州大学 大学院総合理工学研究院 教授。所属団体 / 日本セラミックス協会、日本ゼオライト学会 企画・広報委員、日本放射光学会 評議員

<https://www.sris.tohoku.ac.jp/interview/03/>
<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/nishibori/>

ナノスケール領域には たくさんの興味深いことがある

材料科学とは何か ファインマンの予言

有名な物理学者リチャード・ファインマン教授による1959年アメリカ物理学会での講演。そのタイトルは、"There's Plenty of Room at the Bottom"というものでした。これだけでは何のことかよくわからないのですが、「ナノスケール領域には、まだたくさんの興味深いことがある」と和訳されることが多いようです。

「ナノスケールつまり原子数個～数十個の世界では、マクロの世界とは材料の性質がまったく異なってきます。これは原子の組み合わせによって、そこに発現する機能がまるで変わってくるということです。将来は原子を1つずつ配置して思い通りの物質を作れるようになるだろうと、言ってみれば材料科学の未来を予言するような講演です」と西堀教授は話します。

事実、この講演の内容は、その後急速

に発展してきたナノテクノロジー研究の先駆けとして位置づけられるようになったと言われます。「東北大学の伝統であり、世界的な強みとも言える材料科学、そして多元研の多くの研究者が取り組んでいるのは、まさにこの予言で示されているような研究とすることができます」。

元素の動きに注目して探る 材料科学

SPring-8でX線回折を使った研究支援に携わった後、自分自身でも材料科学の本質について探求したいという気持ちがより強くなった西堀教授は、放射光計測手法は1つではなく、材料の構造と機能の相関を明らかにするためには適材適所の計測法を駆使すべき、とあらためて考えていました。この思いを強く持ち続けてきた積み重ねが、西堀教授の現在の研究のあり方につながっています。

西堀研究室では、さまざまな材料について、なぜそのような元素の組み合わせになるのか、なぜ決まった構造を形成するのか、どうやって機能を発現しているのか、いわゆるメカニズムを明らかにしてい

SPring-8の硬X線領域のビームラインにて／このビームラインでは、X線マイクロ・ナノビームと蛍光X線を組み合わせた、元素・化学状態マッピング、蛍光分光XAFS、深さ分解XAFSなどを中心とした研究が行われています。各種試料の作成・準備も大事な役割のひとつです。「SPring-8には、鹿がたくさんいます。思わず撮りました」と珍しい写真を提供してもらいました。



空や雲との一期一会を楽しむ

航空機から見える空には二度と同じものがないのです、たとえそれが同じ飛行ルートであっても。この時しかないこの雲、この時しかない空の色、まさに一期一会です。旅行するという高揚感よりも、この刹那な空の景色を感じるのが大好きで、席は必ず窓側です。でも最近は、すぐに寝てしまうのがなんととも…。もちろん、家や研究室のデスクには航空機のプラモデルが並んでいます。

MY FAVORITE



ハイブリッド材料

異なる物質を組合せ、元の物質とは異なる新たな性質や機能を創出する材料。

放射光

円形加速器の中を高エネルギーの電子が磁場によって曲げられて円運動するときに、軌道の曲率中心の方向へ加速度を受けて軌道の接線方向に生じる電磁波。

マグネシウム合金

マグネシウムを主成分とする合金。

酸化セリウム

化学式CeO₂で表されるセリウムの酸化物であり、研磨剤、触媒、燃料電池、日焼け止めに使われる。特に、表面に特異な酸・塩基点を持つため、特有の触媒機能を持つ。

くことが研究の基本となっています。

金属、高分子、ハイブリッド、セラミックス。材料に関するキーワードは数多くありますが、「材料の種類、区別にはあまりこだわらない」と西堀教授は話します。確かにそういうくりはあったとしても、原子レベルに落とし込んでいくと、そこで起こる現象の本質は化学結合なのです。

「材料はそもそもいろいろな元素で構成されています。たとえばガラスは、ケイ酸塩(SiO₂)を主成分とする硬くて透明な物質です。シリコンと酸素の組み合わせに他の元素を付加すると、色が付いたり、硬さが変わったりします。組み合わせ次第でガラスの物性がいろいろと変化するため、構成元素の数も増えてきます。その中で、付加された元素がどう動いているか、何を担っているのか、いくつもの構成元素の中のある元素の動きに着目して探っていく分析を、私たちは得意としています」。

階層構造と機能の
相関を理解する

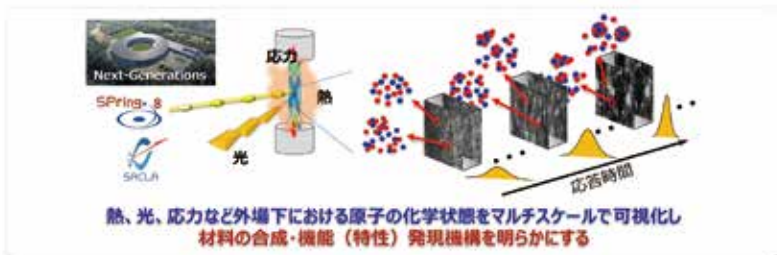
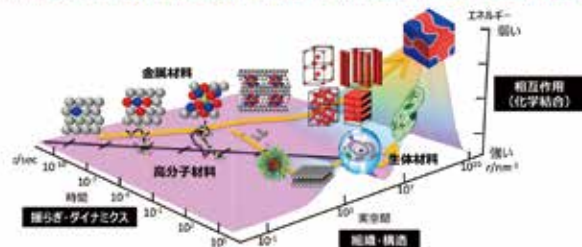
たとえば特徴的な構造をもつマグネシウム合金中の組織は、熱処理温度に応

じて組織形態が変わります。この組織ができるまでの過程を考えると、マグネシウム中に固溶していた原子が局所的に濃化して決まった構造を形成したのちに、それが配列して組織を形成するといった階層的な広がりを持っています。これらはそれぞれスケールが違うため、適した計測方法で1つ1つ解析し、それらをつなぎ合わせて階層間で生じる現象のメカニズムを考えることが必要です。

「時間や空間に応じて形成した複雑な構造は、階層ごとに何か別の機能を発現することがあります。なぜそんなことが起こるのか、その理由を原子レベルで明らかにしていくのが研究の基本ですが、こういった階層構造と機能との相関の理解に対して絶大な力を発揮するツールが放射光です」と西堀教授は解説します。

地球内部の物質組成の探求から始まって、放射光施設での初実験、社会実装を目指した水素ガスセンシング技術の探求、そして材料科学の本質への探求の道程は、それぞれの成果の価値を高め合って、さらに新たな研究の舞台へと可能性が広がってきました。

キーワード：ハイブリッドナノ材料、機能性材料、金属材料、放射光、階層構造、ダイナミクス、メカニズム



西堀研究室では、材料を構成する特定元素の化学状態を、放射光を活用してマルチスケールで可視化し、材料の機能・特性発現機構を明らかにしていく材料科学の研究を行っています。

さまざまな放射光計測を 活用した材料科学

X線分光法を利用して 材料の電子状態を分析

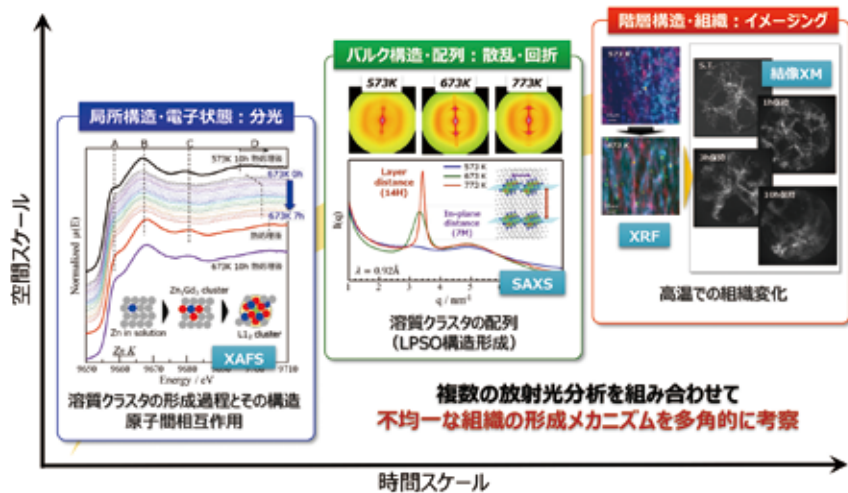
X線と原子の相互作用を利用すると、着目したい元素の電子状態がわかります。これを計測する方法には、X線光電子分光、X線吸収分光およびX線発光分光があります。これらの方法はいずれも化学状態や化学結合の研究に用いることができますが、検出される信号や

得られる情報が異なる。「研究室で主に使っているのは、X線吸収分光です。これは放射光では良く利用される分析法の1つです。計測したスペクトルの特徴的な構造を解析して、価数、対称性、電子状態や局所構造に関する情報を得ることができる、便利な測定法です」と西堀教授は解説します。

例えば、高分子鎖を基材上に固定化

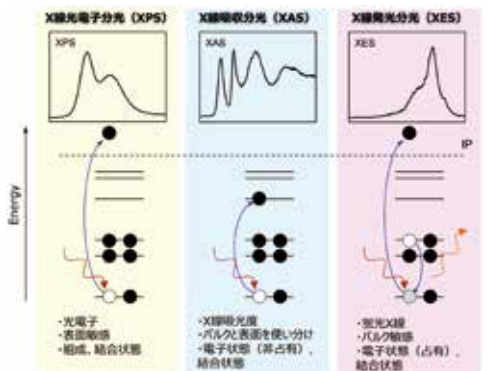
したポリマーブラシは、ブラシ間のナノ空間によりサイズ排除性を有することから、ブラシ間距離に応じたサイズの分子やイオンを選択的に取り込むことができます。西堀教授はこれを金属析出の鋳型として利用するとともに、析出反応中の金属と高分子の相互作用を詳しく調べています。「ここで大事になるのがX線吸収分光です。これで、反応中の電子

構造や組織の形成過程をマルチスケールでその場追跡



K. Ninomiya, K. Itamoto, H. Setoyama, D. Egusa, E. Abe, M. Yamasaki, M. Nishibori, J. Alloys Compd., 928 (2022) 167101

X線と原子の相互作用を利用することで着目したい元素の電子状態がわかる



西堀研究室では、ナノスケールでの構造や組織など、マルチスケールで生じる形成メカニズムに興味を持ち、同一試料に対してX線光電子分光、X線吸収分光、X線発光分光など、複数の放射光分析を組み合わせて、不均一な組織の形成メカニズムを多角的に考察しています。

思い立ったら、ちょっとそこまで、オスロまで

私の気晴らしは、バツと旅行に行くこと。もちろん、空の旅です。急になぜか「ムクの叫び」が見たくなり、ノルウェーに行ったことがあります。オスロ国立美術館で実物を見た瞬間は本当に大感激でした。ムクの叫びは数種類ありますが、一番有名なのがこのオスロ国立美術館所蔵の油絵画です。実はちょうど同じ頃、ムク美術館所蔵のテンペラ画の「叫び」が来日していたことはご愛敬です。撮影が許可されていたので、右は自分で撮ってきた写真です。

OFF TIME



TERM INFORMATION

ナノテラス

東北大学青葉山新キャンパス内に整備が進められている次世代放射光施設の名称。2024年度から運用開始。

X線光電子分光法

試料表面にX線を照射すると放出される光電子の運動エネルギーを計測することで、試料表面を構成する元素の組成、化学結合状態を分析する手法。

X線吸収分光法

元素固有のエネルギー(=吸収端)近傍で内殻電子にエネルギーを与え、その電子を選択的に非占有電子軌道へ遷移させることで、吸収原子の電子状態や局所構造に関する情報を得る手法。

X線発光分光法

X線の吸収などによって生じるX線発光を、回折格子分光器や結晶分光器を用いてエネルギー分析することで、測定対象の物質の電子状態を観測する手法。

その場観察

反応中の材料の構造や化学状態の変化を、実プロセスや実環境に近い状態でその場(=in situ)で観察すること。放射光を利用した観察技術の特長であり、その時間変化を動的に観察することもできる。



研究室では、西堀教授、真木祥千子講師、二宮翔助教ほか、多くの院生、学部生が、さまざまな研究に取り組んでいます。学生同士が課題について議論したり、勉強会を開いたり、活発な毎日です。

状態変化をその場観察し、どのような反応が起こったかを考察しています」。

材料科学の豊富な知見を 共同研究の場でも

西堀教授は、国立の研究機関において触媒反応と熱電交換技術を融合させたガスセンサーの開発に7年間携わった経験があります。

「この研究機関では、産業界や社会への還元、技術移転がミッションとされていましたが、新しい技術を社会実装させることの難しさを体感しました」と西堀教授。「応用研究に遠いと思われていた放射光もその能力や使い勝手が知られるようになり、技術開発、新材料創製、製品の性能向上などに役立てたい、ひいては微視的な世界での挙動を見たいという要請が高まってきました。これまでは経験則に頼っていたものづくりを、科学で記述するものです」と西堀教授は話します。

放射光分析と一口で言っても、装置をどう使うか、どこまで見るのか、データをどう解釈するかという選択と集中が必要となります。幅広い分野の共同研究の課題解決において、西堀教授の高い専門性と豊かな経験、対応力が力強い支えとなっています。

そしてナノテラスへ 若い研究者への期待

西堀教授の研究アプローチの特長は、見たい現象に合わせてさまざまな放射光計測を適切に選択し、組み合わせ、駆使することです。また、外場下でのその場観察を加えることで、材料機能発現のメカニズムを多角的に考察できる、そこが強みと言えます。

材料研究では「何が起こったかを見ること」だけでは不十分で、「なぜ起こったかを明らかにすること」が大事、と西堀教授は話します。ナノからマイクロに至る広い時空間のスケールで複雑な階層構造を形成する様々な材料において、時間・空間軸に「相互作用(化学結合)」軸を加えた新たな概念でアプローチする。そのためには、新たな計測技術の開発が鍵となります。今の放射光計測技術では、複雑怪奇な対象物を的確に捉えることは難しい。そこで、ナノテラスの登場です。これまでとは一線を画した計測・解析技術が材料科学の新たな扉を開きます。

まもなく運用が開始されるナノテラス。かつて自分が「科学の熱気」のように感じた衝撃の体験を、次は若い研究者たちが熱く感じてほしい。西堀教授はそう願っています。

研究室（教授）／研究分野	主な研究テーマ
有機・生命科学研究部門	
ナガツギ フミ 永次 史 生命機能分子合成化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●細胞内での遺伝子発現制御を目指した架橋反応性核酸の開発 ●核酸高次構造に結合する人工分子の開発 ●RNA を標的とした新規化学ツールの開発 ●核酸を標的とした分子認識機構に基づく新規高機能人工分子の開発
ワダ タケヒコ 和田 健彦 生命機能制御物質化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●外部刺激応答型人工核酸の開発 ●がん細胞特異的核酸医薬分子の開発 ●細胞内環境応答性生命機能制御材料の創製 ●生体高分子を不斉反応場とする超分子不斉光反応 ●高感度高時間分解円二色スペクトル測定装置の開発
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
ミズカミ 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
ヨネクラ コウジ 米倉 功治 生物分子機能計測研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●高分解能単粒子クライオEM解析 ●タンパク質、有機分子微小結晶の電子線三次元結晶構造解析 ●AI測定等のクライオEMの手法開発 ●XFELによる有機分子の微小結晶構造解析
タカハシ サトシ 高橋 聡 生命分子ダイナミクス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●一分子蛍光分光法を用いたタンパク質のフォールディングダイナミクス ●癌抑制タンパク質p53 のDNA 探索機構の解明 ●一分子ソーターを用いた新しいタンパク質デザイン手法の開発
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
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チ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な反応解析
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 ●新規ジン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"> ●低損失軟磁性材料およびデバイス創成 ●高性能永久磁石材料の原理研究 ●超高密度磁気記録技術の開発 ●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
カニエ キヨシ 蟹江 澄志 (SRIS) 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 ●ミストデポジション法による導電性薄膜の作製 ●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
イン シュウ 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） ●低温腐蝕で駆動する革新的化学プロセス ●超臨界場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ランダ分析技術の開発 ●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・移動現象効率化のための環境制御技術開発 ●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 (SRIS) 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 ●放射光を用いたゼオライト触媒の精密構造解析 ●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拓 ●X線および中性子の位相イメージング法の開拓とその応用 ●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拓とその応用
キムラ ヒロユキ 木村 宏之 構造材料物性研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●中性子4軸回折装置とその応用法の開発（JAEA東海3号炉 JRR-3M:T2-2 FONDER） ●位置敏感検出器を用いた高効率中性子結晶構造解析装置の開発（J-PARC BL18: SENJU、韓国 研究用原子炉HANARO 2D-PSD） ●多重極限下（高圧・極低温・高磁場・高電場）におけるX線・中性子散乱手法の開発 ●強誘電体、磁性体、マルチフェロイック物質および有機伝導体の構造と物性研究 ●水素結合系誘電体物質の電子密度分布と核密度分布 ●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 (SRIS) 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(B,Al,Ga,In)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(B,Al,Ga,In)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(B,Al,Ga,In)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"> ●X線スペクトロタイコグラフィによる機能性材料のナノ構造・化学状態イメージング ●フェムト秒レーザーによるX線タイコグラフィの基盤技術開発と硫黄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 ●オランダ結像型顕微XAFS法による電池材料のマルチスケール化学状態イメージング ●データ科学的アプローチを活用した位相回復再生法の開発
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による物性評価手法の開発 ●電子顕微鏡用SXES装置の開発と応用 ●収束電子回折法およびビームロッキング電子回折を用いた局所構造解析
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「ナノテラス」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線オランダ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(兼)	<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"> ●窒化物半導体の結晶成長と物理化学 ●超高温材料の熱物性計測 ●金属製錬プロセス開発 ●超高温熱物性計測システムの開発 ●エネルギー・環境材料のプロセス創製
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 ●金属-酸化物-気相間の平衡と反応速度 ●混相流の物性 ●界面における物質移動と化学反応 ●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 ●マグネシウム蓄電池 ●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 ●スコロダ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 ●ナローギャップ酸化物半導体の開発と光電素子への応用 ●化合物半導体・プロセスの開発とエネルギーデバイスへの応用 ●中温域で動作する燃料電池の要素材料の開発
マテリアル・計測ハイブリッド研究センター	
タカハシ マサヒコ 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
アタカワ トモユキ 芥川 知行 ハイブリッド材料創製研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●超分子ローター構造を利用した強誘電体・焦電体・熱伝導体の開発 ●新規な分子性半導体・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"> ●一桁ナノ造形に資する光ナノインプリント成形のレジスト材料とアライメント技術の開発 ●レーザー加工孔版印刷法によるナノリソグラフィプロセスの開発 ●蛍光と散乱光による精密位置合わせと積層化 ●金属・誘電体ナノ構造体の近接場光制御と光化学反応場・自己組織化制御場への応用 ●ナノ構造体を駆使した物性計測技術の開発
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

広報情報室

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

TAGEN FOREFRONTの最新号ができあがりました。本号の登場人物の主戦場は、材料科学、生命科学、材料プロセス、計測技術であり、これぞ多元研というバラエティーに富んだ顔ぶれとなりました。みなさんは、登場人物が揃って口になっている共通ワード、気づきましたか？そう、東北大学青葉山新キャンパスに建設中の次世代放射光施設「ナノテラス」。多元研が牽引して建設を進めてきたこの施設、2023年度中の最初の光の取り出しに向けて、着々と作業が進んでいるようです。「ナノテラス」なんて、ドラえもんのパケットから出てくる道具みたいなネーミングですが、神話の世界で世の中を照らした天(アマ)照(テラス)大御神(おおみかみ)のように、世界の学術や産業にも豊かな実りをもたらして欲しいという願いが込められているとのこと。実際、本号でもあちこちで登場するほどに、期待が高いんです。

本号の登場人物の多くがコロナ禍真っ只中に着任されました。残念なことに私自身、同じ研究所で過ごしながら、お会いする、お話しするという機会がないままに今に至っている方はお一人ではありません。「MY FAVORITE」と「OFF TIME」を通してそのお人柄に触れることができ、次にお目にかかった機会には、旧知の間柄のように振舞える気がします。

さて、この本号は節目の第10号です。本号で現在多元研に在籍する教授全47人を網羅できましたので、そろそろ次のステップを踏み出す時期かもしれません。今、広報情報室の腕利きスタッフは多元研ホームページのリニューアル準備を進めています。ホームページの新たなコンテンツに、リニューアルしたTAGEN FOREFRONTが加わるかもしれません。乞うご期待。

(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
2023年2月28日発行

取材を終えて

それぞれの先生の研究分野は異なっていますが、脱炭素、エネルギー、社会変革、先端技術開発、次世代放射光など、まさにいま世界的な社会課題となっていることへの挑戦が、根本のテーマとなっているように感じます。新たな時代への社会変革を駆動するプラットフォームの役割を果たしていく、そんな取り組みの最先端拠点が多元研であるという印象を強く持ちました。第10号という節目の時を経てさらに深化していくTAGEN FOREFRONTが、これからも未来を切り開いていくことを期待します。



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。

