

M AIMR Magazine

Advanced Institute
for Materials
Research

AIMRマガジン 2014年9月号

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 広報・アウトリーチオフィス
〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1
Tel. 022-217-6146 Mail. outreach@wpi-aimr.tohoku.ac.jp
<http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/>
<https://www.facebook.com/TohokuUniversity.AIMR>



M AIMR Magazine

Advanced Institute
for Materials
Research

05
September 2014

[Spotlight Talk]
**Math Changes
Everything**
数学は全てを変える
Christian Ratsch

[特集]
サメの歯は、なぜ虫歯に
ならないのか？
透過型電子顕微鏡が明らかにした
強い歯の秘密

[AIMR in the world]
**Everyday life at
AIMR**
国際研究拠点AIMRを支える人々の日常

[巻頭対談インタビュー]

異分野融合最前線

Paul S. Weiss

原子分子材料科学高等研究機構(AIMR)主任研究者
(兼)カリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)フレッド・カブリ冠教授

Stanley J. Osher

カリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)教授
(兼)Institute for Pure & Applied Mathematics(IPAM) 特別プロジェクト担当ディレクター



異分野融合最前線

池田進=取材・構成
中道康文=取材・構成・文・写真

CALIFORNIA NANOSYSTEMS INSTITUTE

Paul S. Weiss

原子分子材料科学高等研究機構(AIMR)主任研究者
(兼)カリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)フレッド・カブリ冠教授

Stanley J. Osher

カリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)教授
(兼)Institute for Pure & Applied Mathematics(IPAM) 特別プロジェクト担当ディレクター

米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)には、異分野融合研究を推進する拠点が2つある。1つはCalifornia NanoSystems Institute、通称CNSI。もう1つはInstitute for Pure & Applied Mathematics、通称IPAMだ。今回、AIMRの主任研究者でありCNSI前所長のPaul Weiss教授(写真右)と、その共同研究者でIPAMの特別プロジェクト担当ディレクターを務めるStanley Osher教授に、数学と材料科学の融合がもたらす可能性について語ってもらった。



数学なしでは研究したくない

—はじめに、お二人の研究活動についてお伺いしたいと思います。
現在どのようなプロジェクトを進めていますか？

ワイス教授: 研究を始めた当初は、走査型トンネル顕微鏡 (STM) を使ったナノ科学に関心を持ちました。STMの素晴らしい所は、原子や分子1個のレベルで、電子構造と化学的性質を同時に観察できる点です。私たちは、顕微鏡の装置自体や画像化する方法の改良、さらには観察しやすいように分子を制御する方法を開発することで、分子スイッチや分子モーターといった分子の機能まで観察できる顕微鏡を構築してきました。その過程で、重要なことが分かりました。こうした顕微鏡では、基質となる分子に少量の機能分子を導入して固定し観察するため、オーバーサンプリングしていることが多いということです。たとえば、1万個の基質分子がある中に、機能分子がたった50個しかない状況を想像ください。その場合、基質分子を毎回測定する必要はなく、対象である機能分子の測定に集中すればいいのです。そこで、ここにいらっしゃるオジャー教授やアンドレア・ベルトツィ教授と協力して、すべてのピクセルで均等に情報を収集するのではなく、情報の対象を絞るために、スパース性 (sparsity) ^{*1} と圧縮センシング ^{*2} という概念を利用する取り組みを始めました。

*スパース性:
情報がまだらにしか存在しない状態。不足している情報から、全体像を明らかにする取り組みが行われている。
*圧縮センシング:
少ない計測で全体像を明らかにする取り組み。例えば物体の3次元構造を明らかにするために、従来様々な角度から何百回と計測を行っていたのに対し、統計力学などの手法を駆使して、数回の計測で構造を把握するアルゴリズムの開発が進んでいる。

オジャー教授: スパース性は、画像処理や信号処理などを考える上で非常に重要な数学的概念です。私も、材料科学を専門とする研究者と画像化に関する問題を解決するために、スパース性を使って新しい基礎方程式を得ようとしています。また、少ない計測で多くのデータを得ることができる「圧縮センシング」という数学的なアルゴリズムも今、大きな注目を集めています。インターネットとコンピューターにより、このような数学的なアイデアを、以前よりも容易に、現実的な問題を扱う研究に取り入れることが可能となりました。また、科学者の数学に対する受容度も前よりも高くなってきていると思います。
ワイス教授: 我々の研究でも圧縮センシングが非常に重要な役割を果たしています。現在、大半の画像がJPEG等で表示されています。つまり何らかの形で圧縮されている。動画も同様にMPEGなどで圧縮されている。ですから、実験データも同様に圧縮して記録したほうがいいじゃないかというのが、研究を始めたきっかけでした。まさにそれが圧縮センシングとスパース性ということになります。

STMをはじめとする走査型プローブ (探針) を使った実験は、データを計測する針の位置をプログラミングできますから、どのアルゴリズムがデータの記録と収集をリアルタイムでより効率的に行えるか、絞り込んでいくことが可能なため、圧縮センシングの重要性を証明する素晴らしい機会となりました。そして、電子顕微鏡法、天文学、エンターテインメント、スマートフォン、脳のイメージング、医療用画像といったあらゆる種類・規模の画像装置にもこの手法を適用しようと、比較的簡単に適用できる2つの数学的アルゴリズムを選び、同時にデータ分析の新しい手法も検討しました。数学と連携することで、リアルタイム分析が可能となり、最終的にデータの新しい記録方法も発見することができたのです。

—大変興味深いですね。そのような数学との連携で成果をあげたことで、研究グループに何か変化は見られましたか？

ワイス教授: 大きな変化がありました。私の研究室では、「数学者との連携なしにはもはや問題には取り組みたくない」という学生も出てくるようになりました。これは革命だと思います。私達は結果を一般に公開する予定ですので、軌道に乗れば我々以外にも様々なグループや分野に影響を与えることになるはずですが、さらに私達は、互いに競合させるとまでは言いませんが、異なる数学的手法を平行して開発することにも従事しています。最終的にはある問題に対して最適の手法が選ばれるわけですが、選ばれなかった手法についてもその結果を把握しておくことができます。1人のポストドクの元で、同一の問題または関連する問題について、学生たちが平行して研究を進めています。その過程を通じて複数の手法を同時に発展させていくことができるのです。一頭の馬に限定して賭けをする必要はありません。あらゆる馬に賭けて、走り始めた後にどれが一番速いかを見定めればいいのですから。
オジャー教授: そこから、どうして特定の手法が成功したのかといった、数学的に非常に面白い疑問も浮かび上がってきます。また、その成功の背景にある特異性を把握することで、アルゴリズムを改良することもできます。こうした数学と異分野との連携による科学の急速な変化はいろいろなところで起こっていると思いますが、特にここUCLAで起こっていると感じています。UCLAの研究者なので先入観もあるかもしれませんが。

ここは嵐があつまる場所

—CNSIは、そのような異分野融合の取り組みでUCLAの中心的存在であるかと思います。ワイス教授が6月まで所長を務めていたCNSIの特徴について教えてください。
ワイス教授: CNSIの大きな特徴の一つは、ナノテクノロジーの研究者を中心として、多くの異なる分野の研究者が参加してい

ることです。UCLAには多くの学部があって、30学科、135の専攻課程の研究者がいます。理学系、工学系、医学系が約3分の1ずつ、他に法学、公共政策、公衆衛生、美術、映画、経営などです。CNSIでは、化学者とも、物理学者とも互いの分野の言語を学んで、共通の課題について話し合います。材料科学者も同じです。電気工学者や生体工学者、臨床医、法律家や規制当局者とも話をします。そういうチャンスがいくらでもあって、その結果として私たちは、第一に異なる分野の人たちと話すことが重要だということ、第二にそうするためのスキルを学びました。その結果、異なる分野の人たちがどんな問題を抱えているかを知ることができました。



彼らはなかなか解決できないでいる問題を説明しながら、「これが解決できれば、われわれの分野が変わる」というのです。やがて、参加する教員や学生、ポストドク、スタッフがどんどん増えて、そうした問題に取り組み、その解決に自分たちがどう貢献できるかを模索するようになりました。そうすると、大きな障害があって10年くらい何の進歩もなかった分野で、解決策にアプローチする方法が見つかる。これが実に楽しいのです。そこが人を引き寄せる魅力でもあります。皆、そういう問題に取り組むためにCNSIへやってくるのです。

オジャー教授: ここは嵐が集まる場所とでも言いましょうか、数学部はここから100フィート足らずという環境にあり、医学部も非常に近い。他の大半のキャンパスはこんな風ではありません。UCLAは立地条件に恵まれ、雰囲気も良好です。偉ぶった型苦しい人がいない。人柄の良い人が多く、互いに協力し合おうとしますから、自我が邪魔することがない。学生はこうした魅力的な環境で活躍したいと考えますから、このような環境をもっと普及していきたいですね。

ワイス教授: その通りです。こうした連携を強みとして、優秀な人材の採用や維持が可能となります。先に述べたとおり、学生は専門外の学術分野の問題に取り組むことができます。



オシャー教授:就職面でも有利ですね。こうした論文や研究をもつてすれば、良い就職先が見つかります。学生にとって魅力的な場所なので、集まってくる学生のレベルもかなり高くなってきています。ここの数学部の学生は非常に優秀で、私が学生だったときよりも優秀だと思います。今、学生でなくて良かったと思います。ワイス教授の分野でも同じなのではと思いますが。

ワイス教授:そうですね。そのおかげで、ここでは他でできないことに取り組めます。新しい世界を切り開くことが可能です。

WPIプログラムという長期の助成を活用して

—研究者にとって魅力的な環境を提供しているCNSIですが、何か課題はありますか？

ワイス教授:新しい技術や装置を開発するためのリソースが非常に限られてしまう点です。CNSIはそもそも共同利用を目的とした施設ですので、新しい技術の開発に取り組むための資金額となると国の施設に及ばないのです。

CNSIには最新式の電子顕微鏡と、光学顕微鏡走査プローブ、それからナノファブリケーション装置もあって、大手製薬会社並みの規模のハイスループット・スクリーニングも可能です。そこで利用者の話を聞いていると、どんなことが求められてい

るかが見えてきます。つまり、「こういう測定がしたい」と言われて、そのときは「そんなの誰もできません」と答えるしかなかったとしても、やがて、その技術を開発する価値があるとわかってくる事例がたくさんあるのです。その意味では、私たちは研究のコンテンツやターゲットには事欠きません。

しかし一方で、実際に装置を開発するとなると非常に時間がかかります。私の研究室にも、一つの実験がうまくいくようになるまで10年、20年かかった例がいくつもあります。この点がアメリカの助成サイクルにはうまくはまらないので、こうした実験を行うためには、苦肉の策としていくつもの異なる資金源を組み合わせるのです。AIMRが持っている利点の一つは、助成期間が10～15年と長く、長期的な問題を考えることができる点です。これは非常に恵まれていますね。ドイツのマックス・プランク研究所など世界各地の特殊な研究機関にはそういう所がありますし、イギリスにも長期助成のある極めて重要な機関がいくつかあります。ですから、AIMRはこうした長期の機会を活用して、他の条件では開発が難しい新しいツールの開発・応用に取り組むことが重要だと思います。

—AIMRは長期的な助成期間をいかして、数学と材料科学の連携に研究所全体で取り組みという挑戦的な取り組みを行っています。このような取り組みを世界に広げていく上で必要なことは何だと思いますか？

オシャー教授:重要な問題を見つけて、その問題を解決すること。それにより世界からAIMRの挑戦を真剣に受け止めてもらうことができます。そう思われませんか？

ワイス教授:確かにその通りですね。

オシャー教授:それが最善の方法でしょう。日本には有能な人材が多くいます。しかしながら、日本の数学者との交流で分かったことは、数学界と産業界との間のつながりが薄いという点です。これには驚かされます。日本には、エンジニアリング界または材料科学界、医学界に数学を発信していくという習慣がないのです。

ワイス教授:数学の種類にもよるのでしょうか？

オシャー教授:そうですね。通常、日本で人気があるのは純粋数学です。これは私の経験上の話で、もちろん変わりつつあるのでしょうか。シンガポールや中国、台湾などは違います。日本よりも連携が盛んです。ですから、有能な人が多いというのは良いことなのですが、考え方を少し変える必要があるかと思えます。日本もできるはずですし、是非実践すべきことだと思います。

—本日は大変興味深い話を聞かせていただきありがとうございます。AIMRでは、実験科学者と連携したい数学者に、数理モデルを実験で検証する機会を提供していきたいと考えています。今後、CNSIやIPAMともこうした連携が実現することを願っております。

オシャー教授:非常に良いアイデアだと思いますし、私の同僚たちや他の研究機関の応用数学者の方々にも実社会で活躍してほしい。応用数学者にとって、実際のところそれが一番の望みだと思うのです。実現すれば良いですね。皆さんと連携できることを楽しみにしています。



スタンリー・オシャー Stanley J. Osher
1942年生まれ。ニューヨーク大学で博士号を取得後、ニューヨーク州立大学ストーブルック校准教授、同教授を経て、1977年よりカリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)教授。Institute for Pure & Applied Mathematics 特別プロジェクト担当ディレクターを兼務。2014年、ガウス賞を受賞。

ポール・ワイス Paul S. Weiss
1959年生まれ。カリフォルニア大学バークレー校で博士号を取得後、ペンシルバニア州立大学准教授、同教授などを経て2009年よりUCLAフレッド・カブリ冠教授。原子分子材料科学高等研究機構(AIMR)主任研究者を兼務。2009年より2014年6月までCalifornia NanoSystems Instituteの所長を務める。

01 巻頭対談インタビュー

Paul S. Weiss × Stanley J. Osher
「異分野融合最前線」

07 Spotlight Talk

Christian Ratsch
Math Changes Everything
数学は全てを変える

09 特集

サメの歯は、なぜ虫歯にならないのか？
透過型電子顕微鏡が明らかにした
強い歯の秘密

12 NEWS & INFORMATION

—シカゴ大学とJRC設置協定に調印
—Highly Cited Researchersに選出
—幾原教授、WAC会員に選出
—ワイス教授、
アメリカ芸術科学アカデミー会員に選出

13 AIMR in the world

Everyday life at AIMR
国際研究拠点AIMRを支える
人々の日常

16 EVENT REPORT

—ダン・シヒトマン博士特別講演会
—サイエンスデイ2014
—AIMR、高校生との国際交流のハブに

17 材料科学コラム

「ちょっと寄り道 MATERIALS」第5話

18 New Staff

吉田 浩二

Editor
中道康文

Design/Printing
株式会社 島山デザイン事務所

produced by
東北大学原子分子材料科学高等研究機構
広報・アウトリーチオフィス

Math Changes Everything

数学は全てを変える

Christian Ratsch

クリスティアン・ラーチュ
カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA)
Institute for Pure & Applied Mathematics (IPAM) 副所長

2012年8月、AIMRはUCLAの純粋・応用数学研究所 (Institute for Pure and Applied Mathematics: IPAM)と部局間協定を締結した。ここでは、数学と異分野との連携を推進する長期滞在型の研究所として世界中から注目を集めているIPAMのラーチュ副所長に、異分野連携を円滑に進める秘訣と、一つ屋根の下で数学—材料連携を進めるAIMRの可能性について聞いた。



—まず、UCLA純粋・応用数学研究所 (IPAM)について簡単にご説明いただけますでしょうか。

ラーチュ副所長: 国立の数学研究機関は全米で8カ所ありますが、IPAMはその1つです。米国国立科学財団 (NSF) の資金援助を受け、物理学、化学、工学や社会科学、人文科学といった様々な科学と、数学との橋渡しの役割を担うことを目標としています。IPAMでは年に2回、14週間に及ぶ長期プログラムを実施し、この期間中は様々な分野の研究者がIPAMを訪問します。例えば昨年は、「持続可能なエネルギーのための材料科学」をテーマにしたプログラムを実施しました。

—どのような分野の研究者が参加されたのですか。

ラーチュ副所長: 数学、材料工学、物理学、化学、コンピュータサイエンスなど多岐にわたります。そして参加者全員が、共通のテーマである持続可能なエネルギーを実現する材料、具体的には太陽電池やバッテリー、燃料電池などについて議論したわけです。このようにIPAMでは、様々な専門分野の研究者同士を引き合わせることで、そのなかでも特に様々な研究分野と数学とを引き合わせることを目的としています。

—各分野を引き合わせる上で、数学が中心的な役割を持つ理由は何でしょうか。

ラーチュ副所長: まず、どの分野においても問題解決にむけて理論や方程式、モデルが必要になりますが、それらに関する基礎知識を知る上で数学が必要になるという点が挙げられます。数学者は、方程式の構造を良く理解していますので、他の研究分野において問題の検証方法や解決方法を検討する際、数学

者と連携することで様々な相乗効果が得られると考えています。この他にも、最近よく「ビッグデータ」という言葉を耳にしますが、このビッグデータを扱うにあたって、スマートな方法でデータの整理、検索、構成を行うためにはアルゴリズムが必要です。この場合も数学が非常に重要となるわけです。IPAMの新キャッチコピーである「数学は全てを変える (Math Changes Everything)」は、そういった考えを表しています。

—様々な分野の専門家が参加するワークショップにおいて、専門家同士の議論はスムーズに行われるものでしょうか。

ラーチュ副所長: 答えはイエスでもあり、ノーでもあります。分野によって解釈の異なる用語は数多く存在しますので、はじめは議論が困難な場合がほとんどです。議論を始めた矢先に、用語1つをとっても参加者間で意味や概念を一致させられないという状況に遭遇します。そこでIPAMでは、3ヵ月にも及ぶ長期プログラムを設定し、様々な活動を通じて参加者同士の議論を促すよう取り組みを行っています。

—具体的にはどのような取り組みでしょうか。

ラーチュ副所長: 例えば、長期プログラムの最初の1週間はチュートリアルを実施します。先ほどの持続可能なエネルギーの材料に関するプログラムの場合、物理学者が太陽電池やバッテリーなどの問題について、物理学の観点から数学者に説明し、専門用語についても紹介を行います。次に数学者側が、エネルギー輸送に関して使えるような方程式について、その形や解法を説明します。

このように長期プログラムの最初の1週間は、文字どおり専門分野

の紹介を行います。この1週間が終わる頃には最低でも同じ言語を話せるようになっており、3ヵ月に及ぶ長期プログラムが終わると、参加者は他分野の専門家とも違和感なく議論できる自分自身に気付くようになります。長期プログラムは非常に有益ですが、時間も忍耐も要求されます。それゆえIPAMのような機関が必要になると考えています。

—長期プログラムの評価はどのように行っていますか。

ラーチュ副所長: とても難しい質問ですね。客観的な評価は非常に困難ですが、いくつかの方法で評価を行っています。例えば、長期プログラムの参加者を毎年追跡調査し、プログラムの成果を基に執筆された論文数をカウントします。また、プログラムがきっかけとなって始まった共同研究や、共同で獲得した補助金などを集計します。

しかし、このような数値化されたデータがなかったとしても、ワークショップの参加者の質をご覧になれば、各分野で最も優秀な研究者たちが参加していることがわかりいただけると思います。参加した研究者はみな、3ヵ月間、自分の所属先を離れて日常業務から解放され、IPAMが提供する非常にオープンな環境のなかで、異分野の研究者と共通の問題について議論することを心から楽しんでます。NSFや調査委員会も、このような現状から当研究所の取り組みが非常に有益であると判断しています。

—AIMRからIPAMの長期プログラムに参加した研究者も、非日常的な環境で充実した時間を過ごすことができたことと述べていました。一方AIMRでは、日常的に材料科学者、特に実験科学者と数学者を引き合わせて、全く新しい材料科学を創り

だそうとしています。

ラーチュ副所長: とても意欲的な取り組みだと思います。IPAMでは通常、数学の専門家と計算物理学の研究者を組み合わせ、その後は研究者同士で実験科学者に連絡するという形を取っていますが、AIMRでは実験科学者への橋渡しも行おうというわけです。

実は実験科学者と連絡をとることはそれほど簡単ではありません。IPAMからは建物が離れているので通常はメールで連絡するのですが、実際に会うまでに数日かかってしまうことも多くあります。「ここを聞きたいな」と思ってから5分後には意見交換が始まっている、ということはほとんどありません。その点でAIMRの枠組みは有利だと思います。AIMRの強みの1つと言えると思います。

—また、純粋数学の専門家と実験科学者との橋渡し役として、インターフェースユニットと呼ばれる若手の理論物理学者や理論化学者を配置しています。

ラーチュ副所長: 両分野の用語を理解できる人を配置する方法は非常に有効ですね。両者が忍耐強く話し合えば、違和感なく議論を行うことができるようになるでしょう。

—最後に、AIMRへの期待をお聞かせください。

ラーチュ副所長: 我々IPAMとAIMRは、2012年に協定を結びました。それはAIMRが、研究所レベルでの数学—材料科学連携を推進する世界で最初の研究所だからです。この取り組みを通じて、世界の数学—材料連携をリードし、数学と材料科学のどちらの分野にもブレイクスルーをもたらすことを期待しています。

サメの歯は、なぜ虫歯にならないのか？

透過型電子顕微鏡が明らかにした
強い歯の秘密

世界で一番健康なサメの歯

皆さんは、サメが地球上で一番強い顎を持っていることを知っているだろうか？しかし本当にサメの歯が最強なのかどうかは、「最強」という言葉の意味をどう理解するかによる。もし、サメの歯の強い理由が、硬さにあると考えるのであれば、それは正しくない。

サメの歯は確かに、モース硬度と呼ばれる硬さの指標で5(最大はダイヤモンドの10)を示し、鉄よりも硬いが、それでも最も硬い歯だとは言えない。硬さのみで考えると、実は、人間の歯とサメの歯ではほとんど差はないのである。

しかし、サメの歯には人間の歯にはない大きな利点がある。それは、サメの歯が決して虫歯にならないことだ。サメにとって虫歯になって歯を失うことは死につながるので、虫歯にならないことが大変重要となる。

つまり、自然の選択によってサメは虫歯から歯を守る方法を手に入れたのであり、自然が一番の歯医者だと言える。

サメが歯を守る方法は2つある。まず1つ目は、定期的に歯が生え変わるという仕組みで、通常サメの歯は2週間に1回生え変わる。そしてもう

1つは、サメの歯を作っている材料に秘密がある。サメの歯は、内部に柔らかい象牙質があり、それを硬くてぎっしり詰まった高石灰化組織のエナメロイドが包んでいる。この一番外側のエナメロイドは、フッ素を含む化合物(フッ化物)でできている。このフッ化物がとても重要で、フッ化物には虫歯を減らす効果があるため、サメの歯が虫歯にならずに健康な状態を保つことができるものと考えられている。フッ化物が虫歯を減らす効果は、歯科の歴史の中でも特筆すべき発見であり、これまでも虫歯予防の方法として用いられてきている。だから私たちが使う歯磨き粉にもフッ化物が含まれていることが多い。フッ化物がどのように虫歯を予防しているかについては、ミネラル溶解の抑制や歯垢細菌による酸化の抑制、再石灰化など、これまでに様々な説が提唱されているが、複雑なプロセスが関わっており、未だその仕組みを完全には説明できていない。その仕組みについてさらに詳しく調べるためには、エナメロイド内部の構造を細かく観察していく必要がある。

東北大学原子分子材料科学高等研究機構

王中長・幾原雄一 = 文

サメの歯を透過型電子顕微鏡で観察する際の困難さ

サメの歯のエナメロイドをはじめとして、歯や骨、貝殻など、生物が作り出す鉱物(ミネラル)は「バイオミネラル」と呼ばれている。バイオミネラルの構造は、骨の成長や歯の発達といったことから、腎臓結石や唾石の形成といった病理的な問題まで、生物の多くのプロセスを理解するのにとても重要だと考えられている。そのため、ここ数十年、バイオミネラルの微細な構造を調べる研究が多く行われてきた。

サメの歯のエナメロイドは、高密度のフッ素燐灰石(りんかいせき)の結晶とわずかな有機基質(5~8%)でできている。フッ素燐灰石の結晶はサメの歯の表面に分布しており、直径数マイクロメートルの繊維状の結晶の塊がきれいに配置されている。この繊維状のフッ素燐灰石の結晶内にある細かな構造をさらに詳しく調べたところ、フッ素燐灰石の単結晶の小さな柱(ナノロッド)が束になっていることが分かった(図1)。フッ素燐灰石のナノロッドは、1つが平均50nm以下であり、束状に成長するため繊維のような構造が表れる。

図1のような微細な構造の観察には、透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope:TEM)が使われる。TEMは、試料に電子線を照射して、試料を透過した電子を検出することで像を得る顕微鏡で、バイオミネラルをはじめ様々な材料の微細な構造を観察することができる。しかし、TEMを使ったバイオミネラルの観察には大きな問題があった。それは、バイオミネラルが電子線に敏感でダメージを受けやすいという点だ。バイオミネラルのさらなる詳細な解析のためには、図1で得られたナノスケールの構造よりさらに微細な、原子レベルでの構造を観察する必要がある。分解能を上げるには高い電流を供給する必要があるが、電流値を上げると試料が損傷してしまうため、TEMでバイオミネラルを観察するためにはさらなる工夫が必要である。

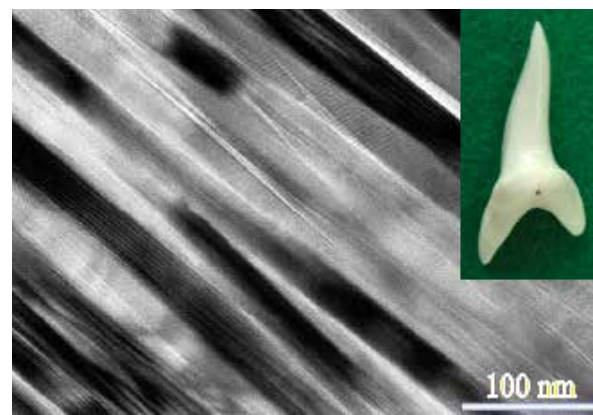


図1: サメの歯のエナメロイドを構成するフッ素燐灰石のナノロッド

ナノスケールのその先を見るために

近年、収差補正透過型電子顕微鏡や走査透過型電子顕微鏡(Scanning Transmission Electron Microscope:STEM)が開発され、材料中の個々の原子を観察できるレベルに達している。STEMでは、0.1nm以下の超極細の電子ビームを使って試料の表面を走査(スキャン)し、試料下部の円環状の検出器で、試料を透過して散乱した電子を計測する。この電子の強度を像として表示することで二次元の像を得るが、この像は高角度散乱暗視野(HAADF)-STEM像と呼ばれ、その強度は原子番号Zの約2乗に比例するため、重い原子ほど明るく写る。

ところが、バイオミネラルは非常に軽い原子でできているために、電子線を照射して得られる信号が極端に弱い。強い信号を得るために強い電子線を照射しなければならないが、そうすると試料が損傷してしまうというジレンマがあり、その観察が難しかった。

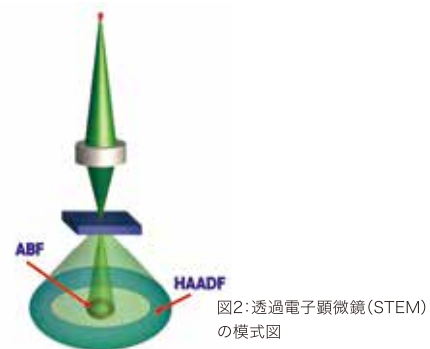


図2: 透過電子顕微鏡(STEM)の模式図

ついにベールを脱いだ強い歯の秘密

そこで我々は、軽い元素の観察に有効な環状明視野(ABF)法を用いた解析を行った。ABF STEM法は、最も軽い水素から重い元素まで、全ての元素の原子列を観察することができる新しい手法である。本手法と弱い電子線による観察を組み合わせることで、原子レベルの解像度を持つバイオミネラルの像を得ることが可能となった。バイオミネラルを電子線による照射損傷から守るために、電子線の電流は3ピコアンペアというSTEMで使用可能な最低の電流を用いた観察を行った。

図3上は、HAADF STEMで得られた画像である。これはバイオミネラルを原子レベルで観察した、最も解像度の高い画像の1つだ。この図を見ると、フッ素燐灰石の中に含まれるカルシウムに、強いコントラストを持つもの(Ca1)と、比較的弱いコントラストを持つもの(Ca2)の、2つのタイプのカルシウムが観察される。HAADFモードでのコントラストの強さは原子密度に依存するので、Ca2に比べてCa1の原子列では密度が高い、つまり上下に重なっていることを示している。

カルシウム以外の原子についても像を得るために、HAADF像と同時に撮影したABF STEM像を図3下に示す。この図はHAADF像(図3上)と同一の構造を表しており、暗い点が原子列を示すABF STEM像はフッ素燐灰石のすべての原子列を示している。フッ素原子はCa2原子が作る六角形の中心に位置している。六角形の近くでは、3つの細長い暗い点が正三角形を形作っており、それぞれの頂点では、2つの酸素原子が非常に近くに位置し、くっつくように並んでいることが分かる。Ca1原子はその三角形の真ん中に位置する。

この観察結果を元に、原子同士の結合について理論計算を行ったところ、驚くべきことにフッ素原子とその近くにあるカルシウム原子が共有結合的結合を形成していることが分かった。一般的に共有結合はイオン結合に比べて強いので、たとえ部分的な共有結合であってもCa-Fの強固な結合が歯を強くする仕組みと関係していることが示唆される。本結果は、フッ素の歯の強度への影響を、原子や電子の構造の観点から明らかにしたものであり、今後さらに優れた歯科材料開発のためのヒントとなるであろう。なお、本研究は東京医科歯科大学の高野吉郎教授との共同研究の成果である。

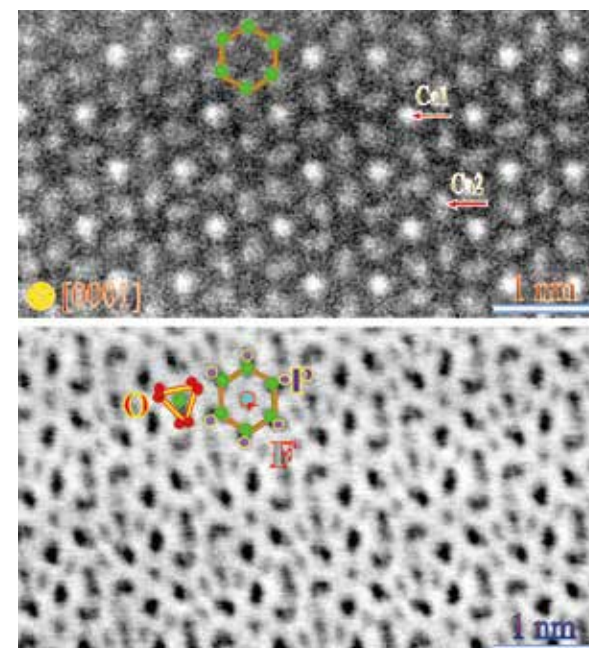


図3: サメの歯のエナメロイドのHAADF(上)とABF画像



幾原 雄一 Yuichi Kikufusa

1958年、三重県生まれ。1988年、九州大学大学院総合理工学研究所博士課程修了(工学博士)。米国ケースウエスタンリザーブ大学客員助教授、財団法人ファインセラミックスセンター-主管主席研究員などを経て、1996年、東京大学大学院工学研究科材料科学専攻助教授、2003年より同教授を務める。2007年よりAIMR主任研究者を兼任。

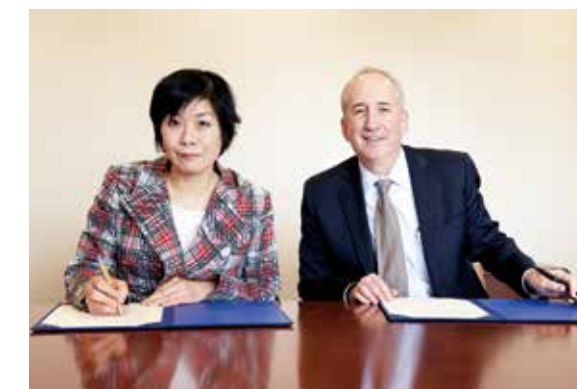


王 中長 Zhongchang WANG

1980年、中国安徽省马鞍山市生まれ。2008年、東京大学にて博士号(工学博士)取得。東北大学AIMR助手、助教を経て、2013年よりAIMR准教授。

シカゴ大学とJRC設置協定に調印

2014年4月16日、AIMRとシカゴ大学はジョイントリサーチセンター(JRC)設置に向けた覚書を締結した。調印式はシカゴ大学ProvostであるEric Isaacs教授とAIMR小谷元子機構長出席のもと、シカゴ大学で行われた。調印式後、以前より共同研究を進めているAIMR主任研究者の大野英男教授とシカゴ大学分子工学研究科長のオシュラム教授も同席し、今後のジョイントリサーチセンターの運営に関する話し合いを行った。また2014年9月には、仙台にてシカゴ大学/AIMRジョイントワークショップを開催することが合意された。本ワークショップは9月18日(木)、19日(金)の2日間で行われ、今後のさらなる共同研究の可能性について議論された。



Highly Cited Researchersに選出

AIMRの陳明 偉教授、高橋 隆教授、アリ・カテムホッセイニ博士が、トムソン・ロイターのHighly Cited Researchers 2014に選出された。Highly Cited Researchersとは、生命科学・医学・物理学・工学・社会科学等の21分野において世界で引用された文献の著者のうち、引用回数の多い研究者上位1%を調査し発表するもので、高橋教授は物理分野で、陳教授、カテムホッセイニ博士は材料科学分野で選出された。

幾原教授、WAC会員に選出

幾原雄一教授が、World Academy of Ceramics(世界セラミックスアカデミー)の会員(Academician)に選出された。World Academy of Ceramicsは二年に一度、セラミックスの文化、科学、技術、工業、芸術の進展に対して世界的に著名な貢献をした人物をメンバーとして選出している。

ワイス教授、アメリカ芸術科学アカデミー会員に選出

ポール・ワイス教授が、アメリカ芸術科学アカデミー(The American Academy of Arts and Sciences)の会員に選出された。アメリカ芸術科学アカデミー新会員の就任式典は2014年10月11日に同アカデミー本部のある米国マサチューセッツ州のケンブリッジで行われる。



Japan-UK Young Scientist Workshopの様子



シカゴ大学との協定交渉

Everyday life at AIMR

国際研究拠点AIMRを支える人々の日常

AIMRは数学と材料科学が融合した全く新しい国際研究所。ここでは、世界中から集まった研究者が、日々実験を行い、議論し、多くの研究成果を生み出している。このような国際的な研究活動を支えるのが、事務スタッフや研究支援スタッフの面々だ。その活動は研究者同様やはり国際的である。今回は、事務スタッフや研究支援スタッフが行っている国際的な取り組みについて、いくつか特徴的なものを紹介する。

中道康文=文・写真

国際水準の研究支援体制を構築するために

国外から新たに着任する研究者受入や、国際ワークショップ開催に伴う講演者の招聘、頭脳循環プログラムを通じた研究者の海外派遣など、AIMRでは事務スタッフが日常的に外国人研究者の受入・招聘・派遣業務を担っている。また海外の研究機関と連携協定を結ぶ際には、協定先の担当者や詳細な条件の調整も行う。これらの業務は、従来研究者が中心となっていた。しかしAIMRでは、事務スタッフが海外の研究者・事務担当者と直接連絡をとり、さまざまな調整を行うことで、機構内の研究者の業務軽減をはかっている。そのような調整を行う際に障害となるのが、海外の研究機関との間にある、経費執行など事務手続きに関する様々な規則や慣習の違いだ。そこでAIMRでは、事務スタッフが海外の大学や研究機関に直接出向き、現場の担当者や意見交換を行うことで、事務制度の違いを比較・認識し、研究者受入や協定締結の手続きがスムーズ

に進むよう業務改善に取り組んでいる。

2012年12月には、経理を担当する平山博隆氏と国際連携を担当する及川洋氏が、AIMRの海外サテライトの1つが設置されている英国ケンブリッジ大学と、海外連携機関であるユニバーシティ・カレッジ・ロンドンを訪問し、現地事務担当責任者とのミーティングを通じて、財務関係、基金関係などの制度について調査を行った。



ケンブリッジ大学で調査を行う

調査の結果、例えば旅費支給ルールについては、原則として実費支給であり、かかった経費についてはホテルを含めすべて領収書が必要であるなど、東北大学と同等かそれ以上の厳格なルールが定められていることが分かった。一見、当たり前のようにも思えるが、このことについて平山氏は「しばしば日本の大学は海外に比べてルールが厳しく手続きが煩雑だと批判されたが、そのようなことはなく、英国でも同様に投資者への説明責任の観点から厳格なルールが定められていることが分かった」と述べている。また翌月に独フラウンフォーファーへ視察に訪れた総務担当の永沼ひろみ氏も同様に、「政府など公的機関からの財源による支出は、本学と同様厳密に執行されており、出張手続きにおいても、間違いなく業務を遂行してきたことの証拠書類を提出させているなど、本学よりも厳しく管理している面もある。訪問を通じて、我々日本の大学が研究者に非効率な事務手続きを強いているのではないかと疑念が払拭された」と同様の印象を述べた。

ダン・シェヒトマン博士特別講演会開催

5月13日(火)、東北大学百周年記念会館 川内萩ホールにおいて、ダン・シェヒトマン博士による講演会、「準結晶—結晶学のパラダイムシフト」を開催した。シェヒトマン博士は、1982年に「準結晶(Quasi-Crystal)」を発見し、この功績から2011年にノーベル化学賞を授与されるなど多くの賞を受賞している。東北大学マルチディメンション物質理工学リーダー養成プログラムと共催で行われた本講演には、ノーベル賞受賞者の講演を聴こうと高校生・大学生などおよそ600名が訪れた。

シェヒトマン博士は、自身が発見した準結晶について、従来考えられていた結晶とは違い周期性がないことを図やグラフなどを用いて分かりやすく説明し、また、この発見にはTEM(透過型電子顕微鏡)が大きな役割を果たしたことを話した。さらに、発見した当時の結晶学では、準結晶という概念はなかなか受け入れられず、一時は苦境に立たされたことを話し、来場者にどんな時も自分の力を信じ、困難に立ち向かうことの大切さを伝えた。



サイエンスデイ2014

7月20日(日)に開催されたサイエンスデイに合わせて、AIMRでは「最先端ラボをのぞいてみよう」と題して研究所の一般公開を行った。数学や材料の不思議について簡単な実験を行ったあと、参加者は共通機器室へ移動し、研究で使用している走査型電子顕微鏡(SEM)を使用しての観察を体験した。500円玉に隠された肉眼では見ることのできない「NIPPON」という小さな文字を探したり、タマシの足をナノスケールまで拡大して観察し、色鮮やかな発色が非常に細かい構造によって生み出されている仕組みについて学んだ。参加者は、普段何気なく見ている材料や生物に、目に見えない構造が隠れていることに驚いている様子だった。

AIMR、高校生との国際交流のハブに

AIMRでは、今年度も多くの国際交流プログラムが開催されている。6月28日(土)には5回目となる高校生向け国際交流プログラムが行われ、さらに8月5日(火)からの3日間は、日英サイエンスワークショップの一環として、日本とイギリスの高校生14名が、AIMRの研究室で実習を行った。実習では、中嶋健准教授の研究室と共通機器室の2グループに分かれ、原子間力顕微鏡と走査型電子顕微鏡を用いて、それぞれ高分子材料や生体材料などの観察・測定を行い、実験結果をまとめたプレゼンを行った。日本の高校生の1人は、イギリスの高校生が手際よく実験を進めるのを目の当たりにし、英語の壁もあってはじめて戸惑いを感じていたそうだが、ワークショップ終了後には、「共に議論しながら発表をまとめることができ、研究と英語の両面からとても貴重な経験を積むことができた」と語った。

さらに、海外研究機関から学ぶべき点多かったと及川氏は語る。「出張旅費に関して言えば、例えばケンブリッジ大学では、航空券や、場合によってはホテルも、大学が旅行会社などにオンラインで直接手配できるシステムとなっていた。研究者が出張旅費を立て替える東北大のシステムとは異なり、研究者に多額の金銭的負担を強いることがないため、ぜひ東北大でも取り入れたいと感じた。」

実際にこの調査をふまえ、AIMRが中心となった働きかけが契機となって、2014年2月、東北大学のルールが改訂され、大学が航空券を購入して、招聘する研究者に現物支給するという取り扱いが可能となった。

また2013年～2014年にかけ、ケンブリッジ大学とのJoint Research Centerに関する協定更新や、シカゴ大学との協定締結の際にもこの訪問調査の経験が活かされた。従来、海外の研究機関と協定を締結する際には、研究資金の執行に関する適切な証拠書類が徴取できるかが大きな懸案と言われてきた。しかし平山氏は、「前回の調査により、本学と同等の執行ルールが定められていることが分かっており、スムーズに調整を進めることができた」とした上で以下のように語った。「会計担当者は、日本であろうと海外であろうと経費執行における透明性・効率性に関する説明責任を負っているため、マインドは我々と何ら変わらない。海外の大学等の事務レベルの担当者と直に議論し、こうした点について詳細に情報交換できたことは今後の業務に大きなプラスとなると感じている。」

学内への波及を目指して

東北大学は「ワールドクラスへの飛躍」を目指し、里見総長のリーダーシップのもと、国際的な頭脳循環のハブとなるべく全学的な取り組みを進めている。この取り組みの中で、AIMRの果たす役割について副事務部門長の佐藤伸一氏は以下のように語る。「世界中から優秀な学生・研究者を受け入れるためには、大学全体でバイリンガルなサポート体制をより充実させなければならない。国際業務を最前線で行っているAIMRの事務部門は、国際業務に興味がある職員にとってのみならず多くの事務職員にとっても経験を積む絶好の場だと言える。ここで蓄積した知識・経験を広く提供することで、大学全体の業務改善に貢献したいと考えており、すでに成果が上まっているとも感じている。」具体的に、AIMRでのノウハウを学内に波及する取り組みも始まっている。例えば昨年11月には、学内向けに国際業務報告会が開催された。また、今年度より開始した海外研究機関からの事務スタッフ受け入れ事業でも、AIMRの職員だけでなく他部局にも意見交換する機会を提供した。受け入れ事業を提案・指揮した国際担当の及川氏は以下のように話す。「職員の海外

出張というのは、これまで他部局においても行われていた。ただ当然、経費や時間の面で実施に制限が多いことも事実だ。もっと多くの職員が国際交流に触れる機会を設けたいと思ったとき、発想を逆転させ、海外の研究機関から職員を受け入れることを提案した。」

受け入れの第1回として、6月には米国カーネギー研究所の職員Michelle Scholtes氏が研修のために来日し、4日間にわたって、AIMRの総務、経理、用度、国際の各担当者から、業務についての説明を受けたほか、本部国際交流課や広報課より東北大全体としての取り組みについて説明を受けた。

AIMR経理担当の齋藤武仁氏は「小切手など日本との習慣の違いから、送金手続きについての違いがあるのは勉強になった。また科研費報告書を事務がサポートしている我々の体制に彼女が驚いていたのが印象的だった」と語る。



経理係から業務説明を受けるScholtes氏(写真中央)

滞在の最後に、研修を総括するプレゼンを行ったScholtes氏は、「AIMRはトップレベルの研究成果を生み出している研究所であり、それを支えるスタッフが、研究者に対して非常に手厚いサポートを提供していることに感銘を受けた」と述べ、特に事故を防ぐための徹底した安全管理や集中ガス管理システムについては、自らの研究所でも導入したいと述べるなど実りの多い滞在となったと語った。今回の受け入れについて及川氏は以下のように振り返る。「1名の受入を通じて、何十人という職員に波及させることができ、費用対効果の面からも、とても効果があると認識できた。今後もこのような機会を活かして、英語で業務をすることを身近に、そして気楽に感じ、国際研究所を支えるスタッフとして充実したサポートが提供できるよう努力していきたい。」

国内外の高校生に、最先端研究に触れる機会を

AIMRの研究者は約半数が外国人であり、公用語は英語である。このような環境を活かして、AIMRでは主に地元の高校生を

ちょっと寄り道

MATERIALS

このコーナーでは、AIMRの研究分野である「材料科学」について、基礎的な事柄、歴史、世界の研究動向、AIMRにおける先端研究、等々をエッセイ風に紹介していきます。

* 第5話 * 結晶と鉱物

ショッピングセンターに行くと、しばしば鉱物や岩石を販売するお店に出会います。様々な美しい結晶、鉱物、岩石、鉱石が並べられ、見ていて飽きません。自然が生み出した造形物の神秘的な姿が人の心を惹きつけます。

ここで、結晶、鉱物、岩石、鉱石と、何となく並べてみましたが、違いは何でしょう？比較的わかりやすいのは、鉱物と岩石、岩石と鉱石の関係でしょうか。鉱物の粒子がたくさん集まってある程度の大きさになっているものを岩石と呼び、また岩石の中で、特に資源、工業原料になる物質を多く含んでいるものを鉱石と呼びます。一番わかりにくいのは、「結晶」と「鉱物」の違いではないでしょうか。

結晶: 原子が規則正しく配列している固体物質。人工的に合成したものも含まれる。原子が規則正しく配列しているので、「結晶らしさ」である平らな面(結晶面)が現れる。

(規則的に配列していないものは非晶質と呼ばれ、ガラスがその代表例)

鉱物: 一定の化学式で表せるような化学組成をもち天然に産する物質。一般的には結晶であるが、天然水銀(液体)ほか、結晶以外でも鉱物に分類されるものがある。

「結晶」は原子の配列に、「鉱物」は天然に産するか否かに着目しています。鉱物の多くは結晶ですが、結晶であっても鉱物でないものも多くあります。現在では物質の合成技術が発達し、様々な人工結晶を作ることができます。それら人工結晶の中で、化学組成、結晶構造(原子の並び方)が天然のものと同じものは「鉱物」と呼ばれますが、天然で見つからないものは「鉱物」とは呼ばれません。

さて、天然で見つからないと鉱物と呼ばれない歴史的なお話を一つ。石英という鉱物があります。主成分は二酸化ケイ素SiO₂で、無色透明の美しいものは「水晶」と呼ばれ、古くより珍重されてきました。石英の内部ではケイ素Siの原子と酸素Oの原子が規則正しく並んで結晶構造を形作っています。石英を1気圧下で573°Cまで加熱すると原子の配列が変わって高温型の石英となり、

更に温度を上げるとトリディマイトやクリストバライトに変化します。このように温度や圧力などの条件変化で結晶構造が変わる現象を「相転移」、同じ化学組成の物質が様々な結晶構造をとる現象、またその生成物を「多形」と呼びます。低温型石英、高温型石英、トリディマイト、クリストバライトは全てSiO₂の多形です。さて、この相転移は、圧力の変化によっても起こります。1953年にコース(L. Coes, Jr.)は、3万5000気圧の高圧力をかけることで、SiO₂の新しい多形、コーサイトを発見しました。新鉱物発見!と言いたいところですが、人工合成物のコーサイトを当初「鉱物」と呼ぶことはできませんでした。当時はまだこの多形が天然で見つかっていなかったからです。その後、1960年に、アメリカ合衆国のアリゾナ州にあるあの有名なバリンジャー隕石孔でコーサイトが発見されました。隕石が地表と衝突した際には非常に高い圧力が発生し、石英の相転移によってコーサイトができたのです。天然で発見されたことにより、コーサイトは鉱物の仲間入りを果たしました。実は、コーサイトよりも更に高い圧力のできるスティショバイトも1962年にバリンジャー隕石孔で発見され、鉱物の仲間入りをしました。

材料科学では天然での有る無しに関わらず、機能をもった物質に関しては全て研究対象としますので、「鉱物」という概念はほとんど出てきません。しかし、人類は天然の鉱物をよく観察することで、目には見えない微小な基本単位(原子、分子、単位胞)が規則正しく積み重なってできているという「結晶」の概念を生み出し、その「結晶」が現在の材料科学の基礎になっていることを思うと、ショッピングセンターで鉱物を眺めることも、あながち、材料科学と無関係ではなさそうです。



池田 進 Susumu Ikeda

1967年埼玉県生まれ。90年東北大学理学部卒業。セメント会社勤務後、東京大学大学院理学系研究科で学位取得。同大学院新領域創成科学研究科助教を経て、2008年よりAIMR助教。10年より准教授、11年より副事務部門長を併任。AIMR事務部門において、分野融合、数学・材料科学連携の支援を行うほか、共通機器の整備等を担当。

吉田 浩二

Koji Yoshida

「企業の方は得られたデータ1つ1つの解釈をしっかりと行い、知財面での対策もしっかりと行っている印象があります。」

決して大学の研究者がしっかりとしていないというわけではないんですけどね、と笑って話す吉田博士は、AIMRに新設された日立製作所との共同研究室にこの8月より着任したばかり。大学院時代は、走査型トンネル顕微鏡や原子間力顕微鏡を使ったナノスケールでの研究を一貫して行ってきた。現在は企業の研究者と全固体電池の開発を目指した研究を行っている。大学と企業の研究者とでは、若干文化の違いもあるというが、しかし自身の研究に対するモチベーションに変化はないという。「高校時代から化学が好きで、社会の役に立つ研究がしたくて東北大学の工学部へ進学しました。今は大学院時代より社会に近い位置で研究を行っているという実感が徐々にわいてきています。」博士課程を過ごしたスイスと比較しても、違和感なくAIMRに参加できたようだ。「AIMRはベルン大学にいた時と、雰囲気はかなり近いです。皆さんがとてもフレンドリーで、ざっくばらんに議論できるのがありがたいです。若手研究者と機構長との飲み会があるのも驚きました(笑)」

日本に久しぶりに帰ってきてやりたいことは、という質問に「温泉に行きたい」という答えが帰ってきた。「近場に遠刈田など良いところがあるのでぜひ行きたいです。あとは時間ができたら、スイスにいたころよく行っていたハイキングも再開したいですね。」

吉田 浩二
AIMR産学連携共同研究部門
日立製作所 次世代革新電池研究室 助手
'83年香川県生まれの31歳。東北大学工学研究科で修士号を取得後、スイス・ベルン大学のThomas Wandlowski教授の研究室へ進学。当地で博士号を取得後、2014年8月より現職。

中道康文=文・写真

