

[特集]

高機能で高性能、夢の材料

「金属ガラス」研究最前線

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 准教授

平田秋彦

[AIMR in the world]

Science Talk Live 2013

第3回 世界トップレベル研究拠点(WPI)
合同シンポジウム in 仙台

by WPI

[インタビュー]

「確信と、責任と」

数学への思いを胸に、革新的な材料科学に挑む

小谷元子

東北大学原子分子材料科学高等研究機構長
東北大学大学院理学研究科教授

[New Staff]

ソフィー・ダンブロシオ



Science Talk Live 2013

第3回 世界トップレベル研究拠点(WPI)合同シンポジウム in 仙台

by WPI

2013 12/14 SAT 場所 仙台国際センター

PROGRAM

- 12:00 - 13:00
受付開始(ブースセッション)
開会までの間、WPI各拠点のブース展示をお楽しみください。

- 13:00 - 13:05
趣旨説明(小谷元子 東北大学AIMR機構長)

- 13:05 - 13:10
開会の挨拶(里見進 東北大学総長)

- 13:10 - 13:15
来賓祝辞(櫻田義孝 文部科学副大臣)

- 13:15 - 15:05
5名の研究者による講演

- 15:05 - 15:30
ブースセッション コアタイム

- 15:30 - 16:40
SPECIAL PLAN 高校生による英語プレゼンテーション

- 16:40 - 17:00
研究者による講評

- 17:00 - 18:00
ブースセッション コアタイム

SPEAKER (講演順)

- 

伊丹 健一郎 教授
名古屋大学トランスフォーメティブ生命分子研究所 拠点長
『新物質イタミンを夢見て』
1971年アメリカ生まれ。合成化学(分子をつなげる技)を専門とし、新しいナノカーボン材料、生命機能分子、医薬品の開発を目指す。過去5年間でテレビ・ラジオ・新聞・雑誌に90回以上も取り上げられている。
- 

アラン リンゼイグリア 教授
東北大学原子分子材料科学高等研究機構 主任研究者
ケンブリッジ大学 材料科学冶金学科長
『自然が魅せる材料開発の未来』
1955年イギリス生まれ。ケンブリッジ大学卒業後、ハーバード大学での研究員などを経て現職。金属材料の微細構造形成に関する研究の世界的権威として知られ、これまでに発表した論文は350を超える。
- 

高山 あかり 博士
東北大学原子分子材料科学高等研究機構 JSPS特別研究員
『五感で感じる電子の世界』
1985年福島県生まれ。博士課程在籍時より、世界最高分解能のスピントラッキング電子分光装置の開発に携わり、界面ラッシュバ効果の観測等の功績により日本学術振興会育志賞、東北大学総長賞を受賞。2013年3月に博士号取得。
- 

廣瀬 敬 教授
東京工業大学地球生命研究所 所長
『地球の起源と生命の誕生』
1968年福島県生まれ。日本学士院賞受賞他、日本が世界に誇る地球科学者。マントル最下層(ポストヘロブスカイト)の発見は「地球科学史における30年ぶりの大発見」として全世界から絶賛、米科学誌「サイエンス」の表紙を飾る。
- 

柳沢 正史 教授
筑波大学国際統合睡眠医科学研究機構 機構長
『睡眠・覚醒の謎に挑む』
1960年東京生まれ。筑波大学大学院博士課程修了。米国科学アカデミー正会員。大学院時代に血管制御因子エンドセリンを、98年に睡眠覚醒を制御する脳物質オレキシンを発見。睡眠の謎を解明すべく世界を舞台に奮闘中。

ブースセッション

世界トップレベル研究拠点プログラム(World Premier International Research Center Initiative: WPI)は、第一線の研究者が見非そこで研究したいと世界から集まってくるような、優れた研究環境ときわめて高い研究水準を誇る「目に見える研究拠点」の形成を目指し、平成19年に文部科学省が開始したプログラムです。このブースセッションでは、全国に9つあるWPI拠点が全て集結し、原子・分子から生命、地球、エネルギー、宇宙まで幅広い分野での最先端の研究をご紹介します。

「見る力」を、「観る力」に。

世界を変える科学者の目

SPECIAL PLAN 高校生による英語での
研究プレゼンテーション



「A Method to Change the Color of Metals by Oxidation」
・山崎 誠仁 ・佐藤 祐介 ・湯澤 翔太郎
仙台第三高等学校



「KMnO₄-Na₂C₂O₄ Redox Titration -The effect of Mn²⁺ as a catalyst-」
・町中 拓実 ・宗像 健一郎 ・清野 智大
仙台第一高等学校



「Verification of Breed Difference through Anther Culture」
・板橋 賢治 ・山崎 道隆 ・高嶋 大輝
古川黎明高等学校



「Adaptive Control Using a Neural Net」
「Cooling of Linear Induction Launcher」
「Fast Single-Point Imaging Electron Paramagnetic Resonance Imaging to study fluctuating Tumor Physiology; k-space and Trajectory Design」
・Michael Stevens ・Matthew Early ・Vishnu Rachakonda
エレノア・ルースベルト高校(米国メリーランド州)

主催

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構(AIMR)

共催

東京大学国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構(Kavli IPMU) / 京都大学 物質-細胞統合システム拠点(iCeMS) / 大阪大学 免疫学フロンティア研究センター(IFReC) / 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクニクス研究拠点(MANA) / 九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所(I²CNER) / 筑波大学 国際統合睡眠医科学研究機構(I²IS) / 東京工業大学 地球生命研究所(ELSI) / 名古屋大学 トランスフォーメティブ生命分子研究所(ITbM)

後援

文部科学省/日本学術振興会/宮城県教育委員会/仙台市教育委員会/青森県教育委員会/秋田県教育委員会/岩手県教育委員会/山形県教育委員会/福島県教育委員会

01 AIMR in the world
Science Talk Live 2013 by WPI
第3回 世界トップレベル研究拠点(WPI)
合同シンポジウム in 仙台

03 スペシャル・インタビュー
小谷元子
「確信と、責任と」

07 Event Report
- ナノツアーズ
- 材料が変える未来の医療
- ゴムの不思議

08 特集
高機能で高性能、夢の材料
「金属ガラス」研究最前線
東北大学原子分子材料科学高等研究機構 准教授
平田秋彦

11 Spotlight Talk
数学の新たな可能性を、
AIMRが教えてくれた
統計数理研究所 統計思考院 / 数学協働プログラム 特任助教
松江要

NEWS & INFORMATION

13 材料科学コラム
「ちょっと寄り道 MATERIALS」第3話

14 New Staff
ソフィー・ダンプロシオ



Editor
中道康文

Design/Printing
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



「確信と、責任と」

数学への思いを胸に、革新的な材料科学に挑む

数学と材料科学の融合という革新的なビジョンのもと、AIMRのトップとして2年間走ってきた小谷元子機構長。その取り組みの確実な成果は、この1年の間に、AIMRの研究者が相次いで栄誉ある賞を受賞するという形でも示されている。AIMRへの思い、そして数学への思いを小谷機構長に聞いた。

Motoko Kotani

東北大学原子分子材料科学高等研究機構長
東北大学大学院理学研究科教授

加藤彰一=取材・文／原淵將嘉=写真提供

小谷元子

「数学の導入によって予想以上の成果が挙がっているのはもちろん、特に若い研究者たちが楽しく研究に取り組んでくれていることをうれしく思います。」

2012年4月にAIMR機構長に就任した小谷元子は、この2年近い日々をこう評価する。創立後5年を経たAIMRは、“融合研究のさらなる推進”という課題を前に、“材料科学への数学の導入”という新たな方向へ舵を切る。その推進役となるべく迎えられたのが小谷機構長だ。

「機構長を引き受けることに、もちろん迷いはありました。理学部数学科の教授として、こういう方向で研究を進めていくというビジョンもあったし、そこにいれば何も困ることのない状況でしたから。その時、あらためて考えたのが“数学の力”です。他分野と出会うことで、科学技術のブレークスルーにつながる新たな視点を提供するという役割を、数学は歴史上ずっと担ってきました。材料科学という分野に数学が深く関わっていくことは、絶対に必要であり、正しい方向に違いない。自分自身の力に自信はないけれど、数学の力に対する確信があり、正しい方向に向かうチャンスがそこにあるのなら引き受けるべきだと考えたのです。」

材料科学と数学が出会う意味

数学を入れることによって材料科学に新しい展開を開くという点に確信はあったが、一方で、AIMR自体が期限付きのプロジェクトであり、じっくり待って成果を得るといよりは、時間を意識しながら成果を出していかなければならないという思いもあった、と小谷は語る。

「研究者としてのこれまでの経験から、物事はあまり早く形にしようとするとか小さくまとまってしまうと分かっていました。本来なら、じっくり待って収穫することが大切です。AIMRについて言えば、そこにはすでに5年間の実績があり、それを元に新しい飛躍をめざそうということでした。ゼロからのスタートではありません。そこで考えたのは、AIMRの強みを活かすのと同時に、新しく加わった数学メンバーがそれぞれの専門知識を生かせる融合研究とは何かということでした。1年間、数学者と材料科学者が垣根を取り払いじっくりと議論を行いました。1対1での話もしました。そうして作り上げたのが3つの

ターゲットプロジェクトなのです。」

数学的手法の導入により材料科学に新たな展開をもたらすというビジョンの実現のため、AIMRでは3つのターゲットプロジェクトを定めた。それが、「数学的力学系に基づく非平衡材料」、「トポロジカル機能性材料」、「離散幾何解析に基づくマルチスケール階層性材料」である。従来の材料科学研究では、実験によって新たな現象を観測し、分析を基に理論的説明を得るといった流れが主流だが、この流れを双方向にしようとするのがターゲットプロジェクトにほかならない。

「数学的手法の導入という新たなアプローチではあっても、材料科学の研究所として最先端の機能性材料の創製をめざすという点では何も変わりはありません。むしろ、この目的を強化する一つの試みと言えるのではないのでしょうか。今までと同じようなことしかできないのなら、材料科学と数学の新たな出会いを作る必要はない。数学を入れることで、今までとは違う新しい材料科学の展開、ブレークスルーとかパラダイムシフトとか言われる、非連続な飛躍をめざしているのです。材料科学の側にとってとても大切だけれど、なかなか解決できない問題、そして数学側からみても新しいチャレンジがあって、やりがいがある。そういうどちら側から見ても面白い問題が見つからないと、なかなかブレークスルーにはつながりません。幸い1年足らずでそのような魅力的な問題がいくつか見えてきて、少しホッとしているところです。メンバーが一丸となって、通常では考えられないくらい真剣に議論してきた、その成果だと思います。」

材料科学への数学の導入という独創的な取り組みを支えているのが、世界各国から集まった若手の理論物理学者と理論化学者からなる“インターフェース・ユニット”だ。メンバーは特定の研究室に所属することなく、それぞれの興味で複数のプロジェクトに参加し、数学者と材料科学者を結ぶ掛け橋となっている。

「私たちは、ターゲットプロジェクトの設定に基づき、そのテーマに興味のある研究者を世界中から集めました。それがインターフェース・ユニットです。若い研究者が自分で自由に問題を考えて、独立して動くことが当たり前だし、それが一番いい成果が出ると思っています。それまでのAIMRのスタイルは、PI(principal investigator: 研究責任者)の先生が

いて、その下に若い人がいるという従来型研究室体制でした。AIMRでは、すべての研究者が自由な発想で自らの興味を追求することを奨励しています。数学ユニット、インターフェース・ユニットのメンバーはもちろん、実験系の若手の研究者も、これまでにない環境で研究できることをやりがいがあると言ってくれています。このようなオープンな環境を彼らに一定期間提供できたことは、それだけでも意味があるでしょう。」

毎週金曜日に開催される“ティータイム”は、学生や若手研究者が世界トップクラスの研究者と自由に議論し合う場だ。研究者がさまざまな制約に縛られることなく、自由に交流し、それぞれの能力を発揮する雰囲気がいまのAIMRにはある。「研究者が自由に交流し合える空間は、当たり前なこと。自分の専門性を確立するとともに、外からの刺激を貪欲に受けて自分独自のフィールドを作り出さなければ、研究者としてのやりがいはありませんから。」

数学への確信と責任を原動力に

中学生の頃から、本を読み、ものを考えて、自分が思いついたことを人に説明するのが好きだったという小谷は、「そういうことを一生の仕事にしたい」と考えていたという。当時はまだ研究者という職業を知らなかったが、「一番好きだったのは数学だから、その頃から数学の研究者になりたいと思っていたのかもしれない」とも話す。

小谷は、数学の魅力をこう語る。「私にとって、我々の住む宇宙の本質に迫るもの、それが数学です。数学は、自然界の様々な現象をどういう文脈で見れば自然に見えるかを考えます。複雑で乱雑に見えたものが、数学の視点で見ると統一がとれたすっきりしたものとして見ることがある。見えた瞬間の快感が数学研究の醍醐味です。また、数学は、外からの要請ではなく、価値観や問題を自分で好きなように設定し、追求していく学問です。正しい設定を考えるのが数学であり、そういう意味でとても自由で面白いのです。」

AIMRの先頭に立ち、数学と材料科学の融合という独創的な取り組みをリードする小谷。その姿はAIMRの多くのメンバーから「格好いい」と評される。中学生、高校生の頃は、リーダーシップを発揮するというタイプではなかったという。

「本をたくさん読んでいたのは、人と付き合うのが得意ではなく、一人でいる方が好きだったから。それは今も変わっていません。大きなグループを率いて、みんなとコミュニケーションをとるといよりは、一人で静かに自分の世界にひたっている方が好きです。1か月くらい他人と話さなくても平気じゃないと数学者にはなれないし…。とはいえ、リーダーという立場になれば、たくさんの人に対して責任が生じます。自分にできる

最大限の努力をする必要はある。また、数学の力に対する確信が私にはあると言いましたが、もし責任を果たさなければ、数学の力に対する人々の信頼をも崩してしまうことになるでしょう。背負いきれる力が自分にあるかどうかはわかりませんが、数学への確信と責任、その強い思いが私の原動力なのかもしれません。」

真のブレークスルーをめざして

機構長就任以来、インターフェース・ユニットの創設、海外3拠点でのAIMRジョイントセンターの設置、大学院生を対象としたサマースクールの開催、独自の財政基盤の充実を図るAIMR基金の創設など、明確なビジョンのもと革新的な取り組みを推進してきた小谷。その目にAIMRの今後はどう映っているのだろうか。

「東日本大震災があり、この2年間はリフォームの時間でもありました。それも終了しつつあるいま、真のブレークスルーを果たしたい。方向は見えてきたし、そこにはいろいろなアプローチがあります。大切なのは、研究者一人ひとりがそれぞれの発想で自由に研究を進めながら、成果を共有し、全体として良い方向にもっていくこと。数学が何となく身近にあって、数学を使うのが当たり前という雰囲気はかなりできつつあります。それをもっと確実なものにしていきたいし、プロジェクト期間終了後もこの研究所は世界をリードする研究所として存続させます。一数学者としては、材料科学の側からいろいろな刺激をうけて、専門である離散幾何解析学の分野をさらに発展させたいと考えています。」

小谷元子 Motoko Kotani

1960年大阪府生まれ。83年東京大学理学部数学科卒業。90年東京都立大学(現首都大学東京)大学院理学研究科博士課程修了。99年東北大学助教授。2004年同教授。原子分子材料科学高等研究機構(AIMR)副機構長を経て、2012年4月から現職。2005年、第一線で活躍する女性科学者に贈られる「猿橋賞」受賞。



ナノツアーへようこそ!

「原子って動かせるんだ!」
今年10月、東北大学附置研究所の合同イベント「片平まつり2013」の一環として開催されたAIMRの一般公開で、特殊な顕微鏡を使って原子でAIMRと書かれた写真を見た参加者から出た言葉だ。
今回の一般公開のテーマは「ナノツアー」。AIMR本館1、2階に見学コースが特設され、順路に従って進んでいくと、顕微鏡を使って撮影された原子や分子の美しい写真が展示されていたり、電子顕微鏡を使って実際に原子を見る事ができたりと、普段目にする事のできないナノの世界を体感できる趣向だ。それだけでなく、ゴムや磁性流体、コンピュータを使った実験ブースも配置され、材料の不思議な性質を楽しみながら学ぶ事もできる。ツアー後半にある「数学の館」では、3重振り子のデモンストレーションが披露され、予測できない動きに参加者

も驚きの表情を浮かべていた。
また、今回が初の試みとなった「ミニトークライブ」では、10名の研究者がそれぞれの研究分野についての講演を行った。研究者の話なんて聞いても分からないと思われぬよう、発表を担当する事になった若手の研究者は、それぞれに趣向を凝らしたスライドや、実演を交えながら専門分野について説明した。
齊藤研究室の邱博士のテーマは磁石。磁石とは何かを簡単に説明したあと、トマトが磁石に反発して動く様子を見せる。驚く参加者にその理由を考えてみてくださいと尋ねると、1人の小学生が「トマトの中の水が反発したから」と正解を答え、今度は邱博士がびっくりするといった一幕も見られた。
科学実験を楽しむだけでなく、研究の現場や研究者の話や聞けるなど、様々な角度から原子分子の世界での研究を体感してもらった今回のナノツアー。来場者からは「原子について深く知ることができ、大変勉強になった」と

いった声が聞かれた。片平まつりは2年に一度の開催のため、今回は2015年に開催予定。



材料が変える未来の医療

「ここに世界一薄い絆創膏が貼ってあります。分かりますか?」
藤枝助教(早稲田大学理工学術院・元AIMR助手)が、絆創膏が貼ってあるという腕の場所を指差すと、誰もが半信半疑でさされた場所を見る。実際、何も貼っていないように見えるからだ。
この絆創膏。実は通常の10万分の1の薄さ、ナノメートルの薄さまでできている。そのため、腕に貼ると薄すぎて見えなくなってしまう。
「我々はこれをナノ絆創膏と呼んでいます。人体に害がなく、やがて分解されて吸収される材料できているため、手術の際に患部を縫う事なく傷口を塞ぐことができます。」

実際の手術映像を使った藤枝助教の説明が進むにつれ、会場からは驚きと感心の声があがった。



AIMRを含む9つのWPI拠点が合同で、今年11月に東京・お台場で開催されたサイエンスアゴラ2013において合同でブースを出展し、各拠点の紹介や、WPI Science Live!と題した講演や実験教室が行われた。AIMRからは、藤枝

助教が、「ナノテク材料が拓く未来の医療!」と題し、先述のような講演を行ったほか、AIMR常設ブースではナノ絆創膏の展示や、ゴムの意外な性質に関する簡単な実験を行った。

身の回りの材料の不思議や、最新技術を目にした来場者の方々からは、「当たり前だと思っていた材料の奥深さを知った。」「ぜひ医療の現場に活かせるよう研究を進めてほしい」といった声が聞こえた。



ゴムの不思議

「世界は動いている」という文字が、TV画面に大きく映し出された。すべての物質は止まっているように見えても実は原子は動いている。これは、中嶋准教授の研究しているゴムの性質を理解するための重要なキーワードだ。
2013年11月22日(金)、仙台市立連坊小路小学校でAIMRの中嶋准教授による出前授業「ゴムの不思議を体験しよう」が行われた。5年生の児童へ向けに行われた今回の授業。中嶋准教授は、常温では弾まないように作

られたゴムボールを取り出し、お湯で温めたり、液体窒素で冷やすことで、弾むようになるのを示す。温度の変化でゴムの性質が変わる事を実演を交えながら解説する中嶋准教授の授業は、多くの児童の興味を引き、ゴムの性質について楽しみながら理解することができたようだ。

最後に質問を受け付けると、「ゴムを溶かしてまた固めたら、元に戻りますか?」という質問が挙がった。中嶋准教授は、通常ゴムは溶けることがなく、もし溶けるような状態になるとしたら、それはゴムとしての特性を失っている状態であるということを知りやすく説明した。最先端

の研究に関わる研究者の言葉を受けて、児童たちはそれぞれに思考を巡らせていた。



高機能で高性能、夢の材料 「金属ガラス」 研究最前線

半世紀来の謎であったガラス物質の原子構造が、数学と材料科学の連携によって解明された。その研究は、今年7月に米Science誌に掲載された。ここでは、研究の対象となった金属ガラスの基礎知識から、原子構造に関する最新の研究までを解説する。

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 准教授

平田秋彦 = 文



1 金属ガラスとは？

金属ガラス研究のはじまりとこれまで

2012年、米アップル社がiPhoneの本体に採用する可能性があるとの情報が流れ、世界で一躍注目を集めた材料がある。それが「金属ガラス」と呼ばれる物質だ。ガラスという言葉を知ると、窓ガラスのような透明な物質を思い浮かべるかもしれない。しかし、金属ガラスは見た目は全くガラスっぽくなく、普通の金属と同様な金属光沢を呈している（前頁の写真参照）。基本的には金属であるにもかかわらず、ガラスのような構造を併せ持っているため、普通の金属より強くしなやかであるという性質を持つ不思議な材料である。



図1: 近い将来、iPhoneにも金属ガラスが使われる？

金属ガラスの研究は、1960年代にアメリカのグループによる超急冷法を用いた金とシリコンの合金でガラス形成が発見されたことに端を発しており、その後様々な金属の組み合わせで合金探索が行われてきた。1990年前後には、東北大学のグループによって3つ以上の金属を組み合わせることで極めて安定性の高い金属ガラスが作製され、今日に至るまで数多くの種類の金属ガラスが開発されてきている。当初は金属ガラスの作製には0.001秒間に1000℃以上上げるような超急冷技術が必要であったが、現在では通常の金属と同様な鋳造法で作ることができるため、初期の頃には得られなかった非常に大きいサイズ（数mm～数cm）のものが得られるようになった。これにより金属ガラスの特徴を生かした様々な応用開発も進展してきている。

金属ガラスの原子構造解析の難しさ

金属の性質は、中の原子がどのように並んでいるか、その構造に強く影響される。一般的な金属の中では、原子は例えば“面心立方構造”や“体心立方構造”のように規則正しく周期性を持って並んでいる。溶かした金属を冷やして固化させると、普通はどうしてもこのような規則正しい結晶構造が自然にできてしまうのである。しかし、金属ガラスの場合、試料全体に渡って、原子が一見“でたらめに”並んでいるように見える。このでたらめさが、金属ガラスが普通の金属に比べて優れた性質を持つ鍵となっている。

さらに金属ガラスの中では、原子がボールを箱に“ぎゅうぎゅうに”詰めこんだような状況で並んでいる。もし原子が結晶のように規則正しく並んでいれば、このようなぎゅっと詰め込む、いわゆる稠密構造を得ることは容易であるが、でたらめな配列を保ったまま詰めるのは意外と難しい。結晶構造以外に、ぎゅっと詰まった安定な構造をとる形として正20面体構造が知られており、古くから金属ガラスは多くの正20面体から成る構造であるというモデルが提案されている。しかし、正20面体構造のみで3次元空間を隙間なく埋め尽くすことは不可能であるという矛盾が解消されないままだった。

実際にどのように原子が詰まっているかを調べるため、これまで主にX線・中性子線回折を用いた数多くの実験が行われてきている。回折とは、波が物質に衝突すると背後に回り込んで縞模様ができる現象のことで、この現象を利用して、X線や中性子線を当ててできた回折図形と呼ばれる縞模様から物質の構造を調べることができる。通常の金属材料は結晶であるため、構造には周期性があり、回折図形にも同じようなパターンの繰り返しが見られる。これをもとに基本単位となる原子配列を決めさえすれば、自動的に試料全体の構造を知ることができる。しかし金属ガラスの場合、構造には周期性がなく、回折図形には少数の非常にぼやけた散乱しか観察されないため、試料全体からの平均的な構造の特徴しか得ることができないのが現状である。このようなことから、金属ガラスの構造解析は原理的に極めて難しいものであった。

2 電子の針と数学で金属ガラスの構造に迫る

電子の針で構造を直接観察する

このような状況の下、我々は金属ガラスの構造をより直接的に観たいと考え、電子線プローブを使った実験を試みている。電子線プローブとは、細い電子線を針（プローブ）のように用い

て物質の性質を調べる実験である。電子は波の性質も持っているため、X線や中性子線と同様に回折図形から物質の構造を調べることができる。さらに電子線は、X線・中性子線と比べはるかに小さく絞ることができるため、ごく小さな領域からの回折図形を得ることが可能である。プローブを4Å（オングストローム、1Å=0.1ナノメートル）以下まで絞ることにより、回折に寄与する原子の数は劇的に減少し、数十個程度にまで抑えることができた。プローブを絞りすぎると散乱がぼやけて見えなくなってしまうため、最適な絞り具合を見つける事が必要となってくるが、これまでのX線や中性子線の実験では試料全体、つまり10の23乗個程度の原子を一度にまとめて観察していたわけであるから、これは劇的な違いである。

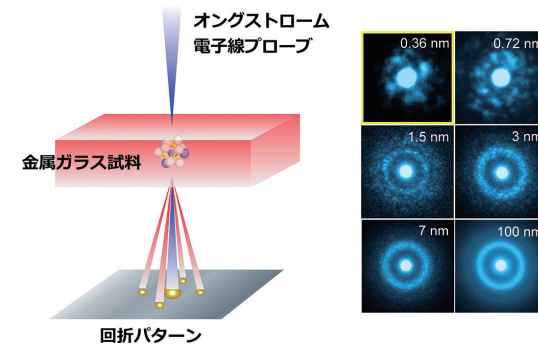


図2: オングストローム電子回折法の模式図(左)と実際の金属ガラスの回折図形

結果は予想以上にうまく観察できており、「これなら非常に小さい原子集団の構造を直接観察して議論できるかもしれない…」と思った。

しばらくして、これまで金属ガラスのモデルとして議論されてきた正20面体構造を実際に観察してみよう、ということになった。しかし、いくら観察しても綺麗な正20面体対称の様子は見られず、その時はまだ我々の実験技術が十分ではないのだろうと考えていた。しかし、その後数ヶ月の間、データを繰り返し調べているうちに、頻繁に見られる模様がかなり歪んだ20面体に起因することに気がついた。さらに、それは正20面体と結晶（面心立方構造）の特徴を併せ持ったような構造であることもわかってきた。これなら3次元空間を稠密に埋めることが可能である。実は綺麗な20面体が実験で見えないのは金属ガラス構造の本質だったのである。

数学連携で変わる金属ガラス研究

今後、実験技術がさらに進歩して、たとえ全ての原子配列が完全に決定されたとしても、ガラスの構造を理解したことにはならない。その雑多な原子配列データから本質を抽出する必要がある。例えば、局所構造の細かい違いを調べる事ができるボロノイ多面体解析という方法があるが、金属ガラスの構造は

基本的にはでたらめなので、それぞれの局所構造の細かい違いには目をつぶって共通する特徴をくり出した方が、内在する秩序を見るのに適しているかもしれないと考えた。幸い数学では、幾何的な“ものの繋がり方”の特徴を代数的に表現する計算ホモロジーという分野が今世紀に入ってから発展してきており、多くの分野で応用され始めていたため、金属ガラスへの適用も少しの工夫により可能であった。AIMRには、材料科学の研究所であるにも関わらず数学ユニットがあるため、気軽に数学者と交流する事ができる。昨年より数学者である松江要助教、小谷元子教授との議論を重ね、計算ホモロジーの手法を使って金属ガラス内の20面体構造を解析したところ、試料全体で似たような歪みになっている事が分かり、電子線プローブによる観察結果とあわせて今年7月にScience誌*に掲載されるに至った。このように少しずつ金属ガラスの違う側面が見え始めており、数学との連携による今後の発展が期待される。

* A. Hirata et. al., Science 341, 376-379 (2013)

3 今後の展望

主に結晶の性質を扱う「金属物理学」や「固体物理学」などの分野のスタート地点は、結晶構造である。構造が周期性を持つ、という特徴を前提に様々な美しい理論が組み立てられている。しかし、金属ガラスのような非周期構造の場合、この前提となる特徴が未だ明らかになっていないため、理論の構築が非常に困難である。このことから、非周期構造の解明は急務であり、古くからある確立された手法と、ここで紹介したような電子線プローブ実験や計算ホモロジーなどの新しい手法とを組み合わせることにより、この分野の基礎科学をさらに発展させることができるよう研究を続けたいと願っている。さらにこれらの知見を、非周期構造を持つ相変化記録材料や二次電池の電極材料など、金属ガラス以外の材料に対して応用することも現在検討している。

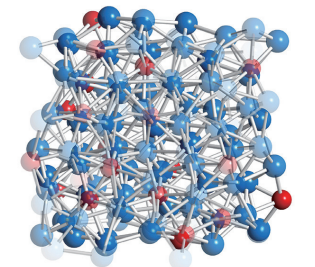
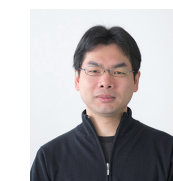


図3: 金属ガラス(Zr80Pt20)の構造モデル。

本研究は、陳明偉教授 (AIMR)、小谷元子教授 (AIMR)、Alain Reza Yavari 教授 (AIMR、グルノーブル理工科大学)、藤田武志准教授 (AIMR)、松江要助教 (理学部、現 統数研) 他、多くの共同研究者の方のご協力によって成し得たものである。ここに記して感謝の意を表す。



平田秋彦 Akifiko Hirata

1974年東京都生まれ。早稲田大学理工学研究科修了。大阪大学産業科学研究所助教、東北大学AIMR助教を経て、2012年より東北大学AIMR准教授を務める。工学博士。

数学の新たな可能性を、AIMRが教えてくれた

本号の特集でも取り上げた、数学と材料科学との連携により金属ガラスの構造を明らかにした画期的な研究。その研究の、数学側を担っていた松江要助教(現 統計数理研究所)が、研究成果がでるまでの道のりと、数学者から見た材料科学との連携に対する想いを語る。

統計数理研究所 統計思考院 / 数学協働プログラム 特任助教

松江要

中道康文 = 文・写真



「大学院の博士課程では、純粋数学としてトポロジー(位相幾何学)、特にホモロジーを使った解析の研究を行っていました。博士号取得後も、純粋数学の研究をずっとやっていきたいという思いが強かったです。しかし東北大に来て、材料科学者と研究を進めるうちに、応用数学、つまり数学の知識を他の分野に応用する研究が、どんどん面白いと思うようになってきました。」

そう語る松江助教。実際に東北大着任後に、材料科学の研究者である平田准教授と共同で金属ガラスの構造解析を行い、今年7月にScience誌に論文が掲載される。その成果をきっかけに、着任からわずか2年あまりで統計数理研究所への異動・数学協働プログラムへの参画も決まった。順調に見える東北大での研究生生活。しかしすべてが最初からうまくいった訳ではなかった。

「ここに来てすぐのころ、チームリーダーである小谷教授に『ガラスの研究をしている方と話をしてくれませんか?』と言われました。そのガラスの研究をしている方、というのが平田准教授でした。」



平田准教授から「ガラス構造の解析に、トポロジーが使えないかと思っているのですが」と相談を持ちかけられた。そこで直感的に、自分が専門としているホモロジー解析が使えるかもしれない、と思ったという。「ただ、実際にどうやって研究を進めるのか、その時は全くイメージできていませんでした。ただ何かできそうという、漠然とした印象を持っただけです。」

そこからホモロジー解析の手法を使って金属ガラスの構造解析が行えないか議論が始まった。特に、平田准教授との研究計画がAIMRのFusion Research Proposalに採択されてからは、集中的に議論を行うようになった。しかし研究の初期段階では、なかなか議論が噛み合わないもどかしさを感じたという。

「研究分野が違うと言葉が通じない、とよく言いますが、その意味をここで知りました。確かに言葉が違うのです。」もちろん、お互い同じ英語、日本語を話すが、同じ単語でも、意味している内容が全く違うのだ。「例えば、数学者の使う位相とはトポロジーを指しますが、物理学者はフェーズ、つまり波の性質の意味で使ったりするのです。」

このような言葉の相違に出会う度に、お互い説明し合って理解を深めていく。そんな作業を繰り返すうちに、今では物理の言葉の意味を少しずつ理解できるようになったという。「しかし、単語の意味は分かっても、お互いの研究内容を理解するには、当然ですがさらなる困難が伴いました。」

松江助教は、そこであきらめる事なく、ひたすら材料科学者に話を聞いて回ったという。「とにかく、自分から動かないと何も始まりません。分からない事があるなら、聞きにいかないとも進みません。」

研究というのは、何度も何度も議論して初めて前に進むものだが、それは他分野との研究でも同じだと気づいた。「他の分野

の研究者と話すのは、兎角ためらいがちです。しかし、せっかく研究をやるからには、守りに入らず、あらゆる可能性を探すつもりで本気で問題に取り組むべきです。そういった熱意は、やがて人に伝わり、同じような想いの人が応えてくれる事をここで学びました。」

特にAIMRには、若い理論物理学者と理論化学者からなるインターフェース・ユニットがあり、数学者と材料科学者の仲立ちをしてくれることも役に立ったという。インターフェースの研究者に「こういうことが知りたいのだけど、なにか知りませんか」と訪ねていくと、その分野に詳しい研究者を紹介してもらって一緒に話を聞いたり、時には彼ら自身と議論を行ったりした。

さらに、自らトポロジーの勉強会を主催し、材料科学者に数学のさまざまな手法を知ってもらう機会を作った。「そのような取り組みを続けていくうち、やがて材料科学者に、数学を使うと面白い研究ができるのではないかという思いが芽生え、自分自身も材料科学の研究を何度も聞いていたうちに、だんだんイメージがつかめてきました。」そして本格的に議論を始めてから半年後に、CHomPというホモロジー解析手法を金属ガラスの構造解析に用いることを見だし、先述の成果につながった。

松江助教は、AIMRで行った材料科学との共同研究を振り返って以下のように語る。

「1つ大きな成果を出す事はできました。でも、まだまだ材料科学に数学が入ったとは言えないですし、逆に言えば、数学の力はまだこんなものではないとも思っています。職場は変わりますが、引き続き材料科学と連携して研究を進めていく事には変わりありませんし、AIMRの方とも共同研究を続ける予定です。そしていつかは、物事を理想化するという、数学の得意とする力を使って、材料の違いを超えて適応できる法則を導きだしたいと思っています。さらに材料科学で得られた知見を数学分野にフィードバックし、例えば抽象的な仮定に意味を持たせられるような取り組みをしてみたいと思っています。」



松江要 Kaname Matsue

統計数理研究所 統計思考院
数学協働プログラム 特任助教

83年広島県生まれの30歳。京都大学大学院で博士号を取得後、東北大学大学院理学研究科数学専攻助教(CREST小谷チーム所属)を経て、現職。

NEWS & INFORMATION

高山あかり博士 ロレアル-ユネスコより奨励賞受賞

高山あかりJSPS特別研究員(東北大学AIMR高橋研究室所属)が、2013年度 第8回「ロレアル-ユネスコ女性科学者 日本奨励賞」を受賞した。

この賞は、日本の若手女性科学者が、国内の教育・研究機関で研究活動を継続できるよう奨励することを目的として、2005年11月、日本ロレアルによって日本ユネスコ国内委員会との協力のもと創設された。高山博士は、世界最高分解能測定によって、半導体-金属界面に巨大ラシバ効果と呼ばれる電子スピンの振る舞いを発見し、スピントロニクス素子開発の基礎となる電子スピンの状態を解明することに貢献したことが評価されての受賞となる。

9月11日にフランス大使公邸にて行われた授賞式では、クリスチャン・マセ駐日フランス大使、クラウス・ファスベンダー日本ロレアル株式会社社長、森まさこ女性活力・内閣府特命担当大臣の挨拶につづき、審査委員である

小林昭子東京大学名誉教授が、受賞理由となった高山博士の研究についての紹介を行った。その後、ファスベンダー氏より高山博士に対して賞状が授与された。授賞式を終えた高山博士は受賞の喜びを以下のように語った。

「ちょうど100年前、東北大学が日本で初めて女子学生への大学教育の道を開いたことが今日の私の研究につながっています。女性研究者はまだまだ少ないですが、東北大学女子学生入学100周年という節目の年に、女性研究者を奨励するロレアル-ユネスコ日本奨励賞を受賞できたことを光栄に思います。指導教員をはじめとする研究室の皆さん、今回選考して下さった審査員の先生方に加え、門戸開放の精神の下、100年の間、女性研究者への支援を続けてこられた東北大学の関係者の皆様に感謝致します。」



シュルガー主任研究者 大和エイドリアン賞を受賞

AIMRのアレックス・シュルガー主任研究者(University College of London 教授兼任)が、大和エイドリアン賞2013を受賞した。本賞は、大和日英基金によって3年に一度、日英の共同研究チームの科学的研究を対象

として贈られる。シュルガー主任研究者は、日本との長年にわたる共同研究が評価されての受賞となる。授賞式は、英ロイヤルソサエティにおいて11月27日に行われた。

ちょっと寄り道

M A T E R I A L S

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3話 *
理論と実験

科学の世界では理論研究と実験研究があり、理論の研究者を理論屋、実験を主とする研究者を実験屋と呼んだりもします。小学校や中学校で夏休みの課題となる理科の自由研究では、まず実験をして実験結果を出しますが、考察のところでは、実験結果が何を意味しているのかを明らかにするために、本に載っている既知の法則を当てはめてみたり、頭の中で独自の法則を導いたりします。この法則を導くという思考過程は、理論研究をしていると言えるでしょう。すなわち、自由研究では理論研究と実験研究を同じ人が進めていることになります。しかし、問題が複雑になればなるほど、理論と実験を同一人物がおこなうことは難しくなり、分業が必要になってきます。理論屋さんと実験屋さんがそれぞれの研究結果を共有し、議論し合うことによって、科学は発展していきます。

もちろん自由研究ではそこまで求められませんが、法則を導くというのは、現象を説明する数式を見出す作業でもあります。理論研究では、数学を用い、現象を数式で表していきます。数式にできるとどんなメリットがあるのでしょうか？例えば、1個の重さ(質量)が m であるりんご2個の重さは $2m$ となります。この $2m$ も数式ですが、2個で2倍になるのは直感でもわかります。しかし、そのうち一方のりんごを高さ h だけ持ち上げたとき、もう一つのりんごよりもどのくらい大きな位置エネルギーを得たか？となると直感だけでは難しく、それが mgh (g は重力加速度)というシンプルな数式で表せることを見抜くためには理論的な考察が必要になります。ニュートンは、りんごの落下を見て、地球とりんごが引き合うように、天体同士も引き合い、この関係が全宇宙でも成り立っていることを考えついたと伝えられています。このニュートンが発見した万有引力の法則を基にして mgh を導き出すことができます。このように理論研究によってひとたび mgh という数式がわかれば、どんな重さの物体でも、他の星(地球と g の値が異なる)での値も、 mgh に数値を代入することで、わたしたちは実験することなしに位置エネルギーを計算で求めることができます。

こう書くと、理論があれば実験は不要のようにも見えますが、理論で考える前に実験で自然界の傾向、規則性を探る必要があり、

また理論ができた後も、それを再度実験で検証する必要があります。1964年にピーター・ヒッグス博士によって「理論的に」予見されていたヒッグス粒子の存在が2011～2013年にフランスCERNの大型加速器LHCを用いておこなわれた実験によってほぼ確定され、ヒッグス博士と、同様の理論を導いていたフランソワ・アングレール博士にノーベル物理学賞(2013年)が贈られたのは記憶に新しいところです。理論によって予見されたものが実際に見つかるといのは、何とも美しい科学の成果であると思います。研究は理論屋と実験屋の共同作業によって深められ、真理の解明へと進んでいきます。

材料は多数の原子の集合体であり、その構成元素、構造の違いによって千差万別の性質が出てきます。このすべての性質変化を完全に記述できる理論はまだありません。しかし、AIMRの数学者、理論物理学者、理論化学者と実験材料科学者の最近のコラボレーションによって、一見複雑に思われる材料の構造の背後に、シンプルな法則が潜んでいる事がわかってきました。例えば、結晶(原子が規則正しく配列した状態)になる傾向の強い金属を原子が無秩序に詰まったアモルファス状態(ガラス)にする技術は東北大学が世界に誇る研究成果ですが、ほぼ無秩序である原子配列の中にもある規則が潜んでいる事を、AIMRの研究者は幾何学の応用によって明らかにしました。すべての性質を理論で予見するにはまだまだ時間がかかりますが、理論と実験、AIMRの場合は、数学者、理論物理学者、理論化学者と実験材料科学者の連携によって、材料の構造と性質の関係を統一的に理解できる日がくるものと期待されます。AIMRでは理論と実験が協力し合うだけでなく、更にそれに数学の視点を導入することで、さまざまな材料の背後に横たわる普遍的な仕組みを見抜き、理論に裏付けされた予見性のある材料科学を構築することを目指しています。



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。



ソフィー・ダンブロシオ

Sophie Dambrosio

なぜ物理学の研究者になろうと思ったのか？

何気なく発したその質問に、彼女はしばらく悩んでこんな答えを返してきた。「とても難しい質問です。その問いに答えるには、私の過去、人生、あらゆることを説明した上で、“私は誰なのか？”という哲学的なテーマについて話し合わなければなりません。」

予想外の答えに少し困っていると、彼女は笑ってこう続けた。「でも、そうですね。とっても単純に説明するなら、“物理が好きだから”です。」

この「好きだから」という感覚は芸術家のそれと同じで、研究者と芸術家の生き方に本質的な違いはないのだと言う。「例えばどちらの職業にも、創造性が求められます。創造性を持たず、ただ大きな流れに身を任せ、他者の後を追うだけだったら、仕事としてはむしろ楽かもしれません。そのかわり、アインシュタインが相対性理論を発見したように、ローリング・ストーンズがロックを創り出したように、特別な存在にもなれないし、世界を変えるようなものは何も生み出せないでしょう。」

世界を変える創造性。AIMRが、それを強く求めていると感じた。「数学と物理や化学、材料科学との融合を目指すことは、とても困難な挑戦です。でも成功すれば、すべての分野を横断的に考えられるようになり、劇的に研究が進むでしょう。AIMRは、この大きな挑戦を成し遂げるため、リスクを負って挑戦することを後押ししてくれます。それがいま、私がここにいる理由です。」

ソフィー・ダンブロシオ
AIMRポスドク研究員

’86年フランス生まれの27歳。エクス＝マルセイユ大学で博士号を取得後、2013年7月よりAIMRポスドク研究員。

中道康文=文・写真