

JST news

未 来 を ひ ら く 科 学 技 術

8

August
2019

特 集

国や分野の垣根を越え
ザンビアの鉛汚染に挑む

海水を安全な飲み水に
世界の水不足を解消へ



国立研究開発法人
科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency

03 特集1

国や分野の垣根を越え ザンビアの鉛汚染に挑む



08 特集2

海水を安全な飲み水に 世界の水不足を解消へ



12 数字に見る科学と未来

深紫外LEDの性能向上で 水銀不使用の殺菌灯を目指す



14 NEWS & TOPICS

素材に微細な傷を付けて色や形を表現 インクを使わず超高精細に印刷



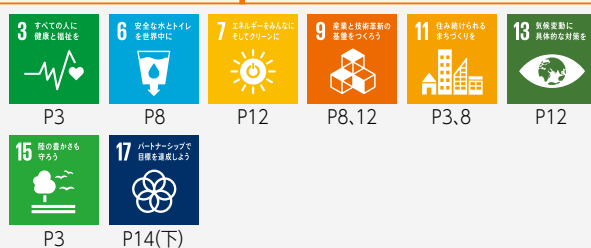
16 さきがける科学人

出合ったものを運命と思い 大切に伝えていく

名古屋大学 生物機能開発利用研究センター
准教授 野田口 理孝



JSTは、シンクタンク機能、研究開発、産学連携、次世代人材育成、科学と社会との対話など、多岐にわたる事業を通じて、持続可能な開発目標 (SDGs) の達成に積極的に貢献していきます。



編集 長：安孫子満広
科学技術振興機構 (JST) 広報課
制 作：株式会社伝創社
印刷・製本：株式会社丸井工文社

特集 1

国や分野の垣根を越え ザンビアの鉛汚染に挑む

アフリカ大陸の南部に位置するザンビアは豊富な鉱物資源を有する国だが、そのために有害な重金属による汚染が社会問題となっている。中でも鉛の生産地であるカブウェは汚染が深刻で、早急な対策が求められている。北海道大学大学院獣医学研究院の石塚真由美教授が率いる研究チームは、ザンビア大学の研究チームとタッグを組み、汚染状況や健康被害に関する研究や環境修復技術の開発に取り組んでいる。



カブウェ
ザンビア



なかた ほくと
中田 北斗北海道大学 大学院獣医学研究院
学術研究員2015年よりSATREPS JICA
在外研究員

いしづか まゆみ

石塚 真由美

北海道大学 大学院獣医学研究院
教授

2015年よりSATREPS研究代表者

研修の引率をきっかけに
深刻な鉛汚染を知る

鉱物資源が豊富なアフリカ大陸では古くから盛んに採掘が行われてきた。その負の遺産が、人体に有害な重金属による深刻な環境汚染だ。アフリカ南部に位置するザンビアのカブウェも汚染が深刻な地域で、世界で最も汚染された町の1つと呼ばれることもある。北海道大学とザンビア大学の共同研究チームは、JSTがJICA(国際協力機構)と連携で運営する「地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム(SATREPS)」で、この地域の鉛汚染の対策に取り組んでいる。

プロジェクト終了時に両国が笑顔で乾杯できるようにという願いを込め「KAMPAI(Kabwe Mine Pollution Amelioration Initiative)」と名付けられたこのプロジェクトは、ある偶然をきっかけに始まった。日本側の研究代表者である北大大学院獣医学研究院の石塚真由美教授はこう振り返る。「北大の獣医学部とザンビア大学とは、古くから交流がありました。そうした関わりを生かし、文部科学省の事業で北大の学生がザンビアで1カ月間の研修を受けるプログラムが実施されました。その引率役としてザンビアを訪れた際に、カ

ブウェで鉛汚染が起こっていることを知ったのです」。

滞在中に石塚さんの専門が毒性学だと知ったザンビア大学の研究者が、カブウェの鉛汚染対策への協力を打診してきたのである。しかし、それ以前に石塚さんが研究していたのは、ダイオキシンなどの有機化合物で、鉛については毒性学者としての基礎知識のみだった。しかも、石塚さんにとっては初めてのアフリカ訪問で、右も左もわからぬ状態。どこまで貢献できるかは未知数だったが、まずは鉛汚染の実態を把握しようと過去の文献を調べることにした。

「環境汚染が起こっている場所では汚染の程度などを調べた結果が報告されているはずなのですが、ザンビアに関しては環境汚染の論文はほとんど見つからなかったのです」と当時の驚きを語る。もちろんまったくなかったわけではないが、欧米の研究者が単発で調査した結果がわずかに見つかるだけで汚染の全貌はわからなかった。「自分たちで調査するしかない」と考えた石塚さんは、ザンビア大学の協力を得てザンビア各地の鉛汚染の実態調査を進めることになった。

若手研究者に背中を押され
対策を視野に入れた調査へ

石塚さんは自身が主宰する毒性学教室の若手研究者や学生を現地に派遣し、ザンビア各地で土壌サンプルを採取し、分析した。当初の情報通りカブウェの鉛汚染が最も深刻なことが明らかになり、以降カブウェに集中して、鉛の汚染源やその拡散経路を解明する調査を続けた。

この時、調査に参加していた学部生の1人が、現在はKAMPAIプロジェクトでザンビアに駐在している中田北斗学術研究員だ。「現地での調査は2週間ほどでしたが、私も一緒に参加した仲間もやりきれなさを感じることがありました」と話す。現地での分析により鉛による汚染状況はわかりつつあったが、住民から対策を問われても何も答えられない。その忸怩たる思いを、仲間と共に石塚さんにぶつけた。



「中田君をはじめ調査に参加した数人から『分析はするけれど、それ以上のことはできない』、『何のためにやっているんだろう』と言われてしまったんです。痛いところを突かれ、はっとしました」と石塚さん。鉛の汚染状況や住民の健康被害の調査は毒性学教室だけでもできる。しかし、鉛を封じ込めたり除去したりといった対策を講じることは難しかった。対策を前提としない調査に歯がゆさを感じていたのは、実は石塚さんも同じだったのだ。「石塚先生自身、環境問題に関心があって毒性学を研究しているのですから、対策の必要性は十分にわかっていたと思います。当時は生意気でしたね」と中田さんは笑うが、その思いが石塚さんを動かすことになる。

石塚さんは、これまで踏み出せずにいた対策の検討まで盛り込んだ研究提案書の作成に取りかかった。この取り組みが巡り巡って工学部の研究者に伝わったことが、思いがけぬ展開につながった。石塚さんはこう説明する。「以前から知り合いだったのですが、突然、協力したいという申し出を受けました。工学部には環境修復の専門家がいますし、農学部なら土壌を改善する技術もあるでしょう。保健や経済の専門家がいれば健康被害の把握や、それによる経済的な損失も算出できます。他学部の先生方の協力が得られたことで、対策を含めた研究体制が整えられました」。



■ 図1 ザンビアの獣医局と合同で調査を実施し、環境情報や動物試料を採集した。足元に置かれたカゴ型トラップや中田さんが手にしている粘着トラップは、ネズミやトカゲの捕獲に使う。

こうして2015年から、日本とザンビアによるKAMPAIプロジェクトが動き出した。

プロジェクトが掲げた3つの目標は、汚染メカニズムの解明、健康や経済リスクの評価、そして環境修復技術の開発だ。効果的な対策を講じるには、汚染の状況や拡散経路などを正確に把握する必要がある。また、対策が確実に実施されるためには、汚染による健康リスクを評価し、経済効果を定量的に示すことも重要だ。これらを並行で進めることで、実現可能性を高めることを狙っている。

環境中の鉛濃度を調べ
拡散経路を明らかに

汚染状況の把握や拡散経路の解明には、地形や地表情報に関する詳細な地図が必要だ。しかし、植生や農地開発に関するデータはほとんど収集されておらず、鉛濃度と環境の関係を評価することが難しかった。そこで取り組んだのが、土壌、植生、粉じん、水などを調査し、汚染源となる鉱山跡地を中心に地図化することだった。地域内を歩き回っての調査に加え、人工衛星画像も活用した。

人工衛星画像のスペクトル画像を解析すると林、農作地、草原、湿地といった地表データや地形データが広範囲で得られる。データベース化もされてお

り、過去にさかのぼることで季節変動や長期的な変化を捉えることも可能だ。こうして得られたデータを、地上のサンプリング調査で集めた情報と組み合わせることで、汚染状況が地図上で可視化できた。調査する上で重要な情報であるとともに、将来予測シミュレーションなど汚染対策での活用も期待されている。

汚染経路の解明についてはプロジェクトで最も力を入れているところだ。鉱山跡地の鉛がどのように広がり、人体に取り込まれるのかがわかれば、生活する上で何に気を付ければよいかのヒントが得られるからだ。現地の獣医局との合同調査によりその一端は明らかになりつつあると石塚さんは話す(図1、2)。「食事などにより口から取り込まれるというのももちろんなのですが、鉛が細かい粒子となり粉じんとして空気中に飛散し、呼吸によって取り込まれる量も多いようなのです」。

口から体内に取り込まれた鉛は、血液に入って全身を巡った後、まず肝臓や腎臓に、さらに骨に蓄積する。しかし、草の生えない裸地で暮らす野生動物では、草地に暮らす動物と比べて鉛濃度が高く、さらに肺への蓄積が多かった。裸地では草地と比べて粉じんが巻き上がりやすいことから、呼吸によって多くの鉛が体内に取り込まれると考えられるのだ。



■ 図2 植生の異なる地域で野生動物を集め、鉛濃度を比較する。写真は集落での採集の様子。動物が隠れていそうな隙間を探索し、素早く捕まえる。

子供から基準値を超える鉛 調査データ提供で医療に貢献

多量の鉛が体内に取り込まれ蓄積すると貧血や神経症を発症することが知られている。いずれも鉛中毒特有の症状ではないため、どの程度の血中濃度で症状が現れるかを明確に示すことは難しいが、多くの国で血中濃度1デシリットル当たり5～10マイクログラムが指標とされている。中田さんはカブウェに住む子供たちを対象とした調査結果について「鉱山近郊では、調査した子供たちのほぼ100パーセントが1デシリットル当たり10マイクログラムを超える鉛濃度を示しました。100マイクログラムを超える子供も少なくありませんでした」と説明する(図3)。

基準値の10～20倍とあまりに高濃度なため、学会発表などでデータの信頼性を疑われることもあったほどだと石塚さんも話す。「毒性学的に信じられない値です。1デシリットル当たり100

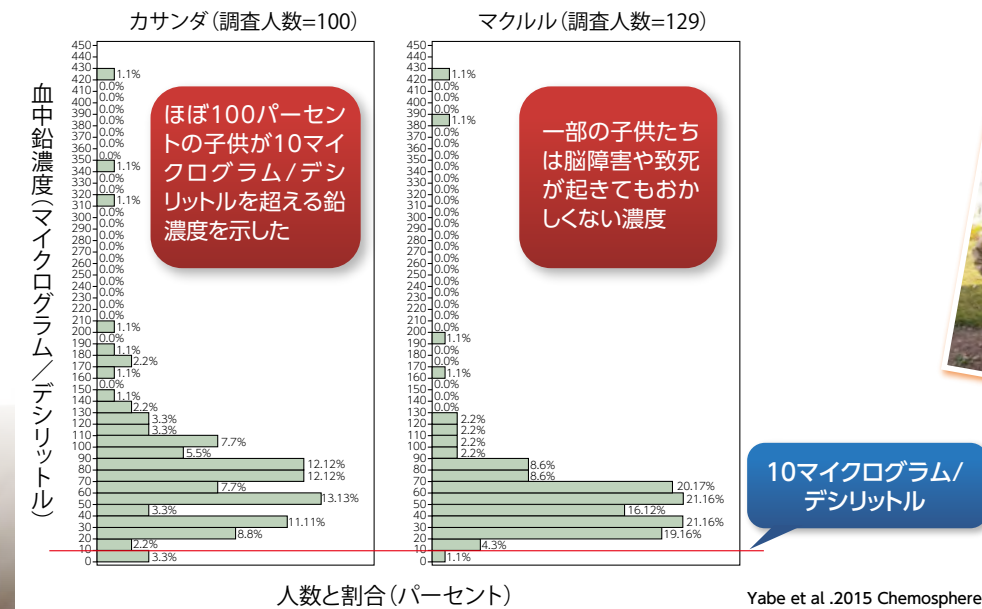
マイクログラムは教科書では致死量とされる濃度ですから、最初にデータを見た時は私自身も疑ったくらいです」。これでは鉛を原因とする何らかの症状が現れても不思議はないが、必ずしも症状が見られるわけではない。子供では特に神経発達に深刻な影響が出やすいため、教育学部と連携しながら4歳から12歳を対象に精神発達や知的活動に関する調査も進め、血中濃度との関係を詳細に調べている。

同じ地域での調査では、野菜の鉛濃度は思ったほど高くない一方、盛んに飼育されている地鶏は餌と共に鉛に汚染された土を飲み込み高濃度の鉛を蓄積していることが明らかになった。この知見に基づき、現地の獣医を通じて地鶏ではなくブロイラーの鶏肉を推奨する、鉛が蓄積されやすい肝臓や腎臓は極力食べないといった生活に役立つアドバイスが可能になってきた。

得られた情報を、治療に生かすための働きかけも開始している。プロジェク

トでは医療の提供が難しいことから、カブウェで実施されていた世界銀行のプロジェクト(ZEMERIP)と覚え書きを締結。石塚さんらが現地調査で得た環境、健康、暮らし向きに関するデータを提供し、ZEMERIPが治療活動、医療支援活動に役立てることで合意し、すでにデータの提供を開始している。

「調査開始前は地元の人の反発もあるのではと考えていましたが、彼らも鉛汚染に不安を感じていたためか血液検査なども抵抗なく受け入れてもらえました。私自身家族と共にザンビアに住み、問題をより自分ごととして感じられるようになったことも信頼関係を築くのに役立ったように思います」と中田さんが話すと、石塚さんはこう続ける。「開始当初は調べることにしかできないというジレンマがありましたが、世界銀行との連携や環境修復法の開発などで少しずつ住民に還元できるだろうと考えています」。



■図3 鉱山に近いカサندا、マクルルでの調査では、ほとんどの子供で基準値をはるかに超える鉛が検出された。



■図4 鉛不動態化剤の効果を現地で検証している。盛り土の中心に集水ピットを設け、浸出水の成分を分析する。水に含まれる鉛の濃度で鉛不動態化効果を確認する。

信頼関係を築き問題解決へ 世界に飛び出す人材を育てる

環境修復の見通しを石塚さんはこう語る。「カブウェの汚染は予想以上に深刻です。特に汚染がひどい地域は修復が難しく、立ち入りを禁止することが現実的だろうと考えています。その上で、鉛がこれ以上広がらないような対策を検討しています」。

対策の1つが植物を植えて粉じんの飛散を抑える試みだ。野生動物の調査で、草地に生息する個体よりも裸地の個体の方が体内の鉛濃度が高かったことからヒントを得て、植物を植え地面を覆えば飛散防止効果があることを確認した。選んだ植物は、レモングラスやベチバーだ。「鉛に汚染された土地でも育ち、鉛をほとんど吸収しません。生育後はハーブや香料、精油の原料として販売できますから、現金収入につながるというメリットもあります」と中田さんは説明する。植栽が進んで粉じんの飛散が抑えられれば、鉛汚染の対策は前進するに違いない。

並行して鉛の飛散や水への溶け出しを防ぐ鉛不動態化剤の開発も進める。「鉛に汚染された土壌をザンビア大学に運び、開発した鉛不動態化剤を試しています。効果が確かめられれば、近い将来、汚染地域で使えるでしょう」と石塚さんは期待を込める(図4)。留意したのはザンビアで入手可能な資材のみを使うことだ。入手困難な資材を使っているのは、どんなに有効性が認められようとも汚染

地域で使えないからだ。ザンビア大学やカブウェ市役所との連携も生かし、着実に歩みを進めている。

プロジェクトの後半に入り、啓発活動にも力を入れる。まずは汚染地域へは立ち入らないことを徹底していく予定だ。「住民たちはあの地域は危なそうだと思っていても、まあ大丈夫だろうと判断してしまう。データに基づき危険性を示し、理解してもらうことで、意識が変化することを期待しています」と中田さん。

石塚さんは「カブウェで培った技術は、いずれ他の地域での環境汚染にも活用できると考えています。社会事情や汚染の原因となる物質も異なるでしょうが、方向性は変わらないはず」と意気込む。

各地の問題を解決するには人材の育成も欠かせない。「知識や技術も必要ですが、大事なのは現地の人たちと信頼関係を築き、一緒に課題を解決できること。教室ではおとなしい学生がすぐに現地に溶け込んだりしますから、適性はわからないものです。可能性を発掘し、新しい世界に飛び出せるよう背中を押してあげたいですね」と目を輝かせる。

有用な技術が開発されたとしても、現地の人々と協力し合ってその技術を活用する人材がいなければ、開発途上国の社会問題を解決に導くことは難しい。SATREPSでの活動を通じて、文化も風習も異なる社会に飛び込んで技術を生かす人材が育まれ、日本が国際貢献していく力も高まっていく。



ザンビアからの留学生アンドリュー・カタバさん(右)と実験室で。日本だけでなくザンビアの研究者育成にも力を入れる。

第7回アフリカ開発会議(TICAD7)でKAMPAIプロジェクトを紹介します。

TICADは、日本政府が主導し、国連、国連開発計画(UNDP)、世界銀行およびアフリカ連合委員会(AUC)と共同で開催する国際会議です。



ブース出展

日時 8月27日(火)～30日(金)
場所 パシフィコ横浜 アネックスホール A-84 番ブース

- 日本・ザンビア両国の研究者が、研究成果や今後の展望を丁寧に解説します。関連グッズも配布予定。



口頭発表

日時 8月29日(木) 13:00～14:30
場所 パシフィコ横浜 展示ホール B-07

- 鉱床由来の鉛汚染に対する獣医・工学・農学などさまざまな専門領域からのアプローチおよび成果を紹介。ザンビア大学のプロジェクトリサーチマネージャーも来日し、登壇します。



<https://ticad7.city.yokohama.lg.jp/>

特集 2

海水を安全な飲み水に
世界の水不足を解消へ

「水の惑星」と呼ばれる地球。表面積の約70パーセントを水で覆われているが、その大半は海水と氷河で、生活や工業に使用できる淡水は全体の0.01パーセントに過ぎない。センター・オブ・イノベーション(COI)プログラムの信州大学アクア・イノベーション拠点は、ナノカーボン材料や物質分離技術を生かして、水に含まれる不純物を除去できる水処理膜を産学官連携で開発している。海水から淡水をつくり、また、汚れた水をきれいに再生し、世界中の誰もが豊かな水を手に入れられる未来を目指す。

えんどう もりのぶ
遠藤 守信
信州大学 特別特任教授
2013年よりCOI研究リーダー

つづき こういち
都築 浩一
日立製作所 水・環境ビジネスユニット
技術アドバイザー
2018年よりCOIプロジェクトリーダー

深刻化する水不足
ナノカーボンが鍵

人類が生きていくために欠かせない水。人口増加や気候変動、経済発展に伴って水の需要は高まるばかりで、そのため限られた水資源の有効活用は喫緊の課題だ。現在、アフリカやアジアを中心に11億人以上が安全な飲み水を確保できていない。特に農業用水が不足し、およそ9億人が食糧を十分に得られていない状況だ。産業廃水や資源産出現場での水の汚染問題に対してもより高度な対応が求められている。

「さまざまな水源から、きれいな淡水を低コストでつくる技術を開発して、安全で健康的な生活を支える水循環社会を構築するのが目標です」と、信州大学COI拠点のプロジェクリーダーを務める日立製作所の都築浩一技術アドバイザーは語る。海水や地下水の不純物を効率良く除去すれば、使える水の量が増える。不衛生な水で命を落とす人々も多く、きれいで豊かな水を確保できれば、人類の平均寿命は約2年も延びると推定される。

キーテクノロジーの1つとして、信州大拠点はナノカーボンを使用した

水処理膜を開発している。ナノカーボンは非常に強靱で、優れた導電性や熱伝導性、化学的特性を持つ最先端の炭素材料である。研究リーダーとして拠点を率いるのは、信州大学の遠藤守信特別特任教授。ナノカーボンの1つである筒状炭素物質「カーボンナノチューブ(CNT)」の量産技術を開拓した第一人者だ。「ナノカーボン膜研究で大きな技術革新を興せるという強い直感がありました」と遠藤さん。

信州大拠点には、ナノカーボン材料や水処理膜、海水淡水化プラントを扱う企業や、計算機化学を得意とする研究機



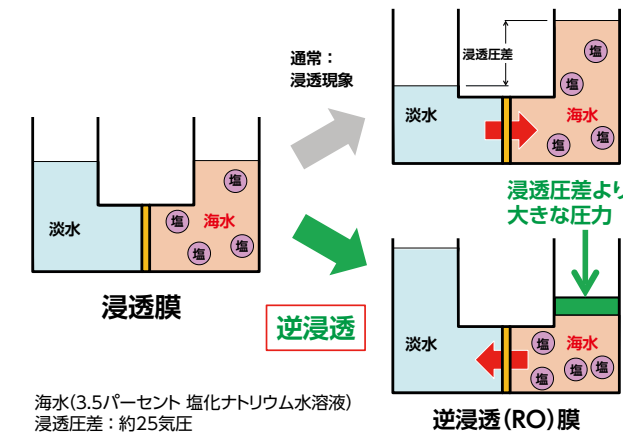
■図1
信州大拠点の中核施設である信州大学国際科学イノベーションセンター内では、拠点の概要や研究成果を映像とパネル展示で紹介している。手前にはアクア・イノベーションが達成された未来を描いたジオラマが広がる。砂漠だった場所に、海水淡水化、随伴水処理、かん水処理、水処理再生設備などが設置され、高層ビルなどの商業地域、リゾート地域、住宅地域、農業地域が新たに出現し、持続可能都市が構成される。

関などが参画している。それぞれの世界屈指の技術を融合させて、革新的な機能・性能を持つ水処理膜やその応用システムを開発し、「アクア・イノベーション」を興そうとしている(図1)。

不純物の目詰まりが難点
汚れに強い膜に期待

豊富な水源として注目したのが、地球の水の97パーセント強を占める海水だ。海水淡水化技術の1つに、「逆浸透膜(RO膜)」と呼ばれる、浸透圧の原理を利用したものがある。無数の微細な孔がある膜は水分子だけを通し、海水から塩分などの不純物は濾し取って、海水から淡水を分離する(図2)。

エネルギー効率が良く、操作が簡単なRO膜法は、海水淡水化技術の主流となっている。とりわけ水不足が深刻な中近東各国を中心に、RO膜を利用



■図2
直径約0.5ナノメートル(ナノは10億分の1)の孔が無数に開いた膜は、水分子だけを通して不純物を通さない。この膜を隔てた左右にそれぞれ淡水と海水を入れたら、同じ濃度になるように淡水側の水分子が海水側へ流入する。この時、膜には濃度に応じた浸透圧が発生するが、それよりも大きい圧力を海水側にかけることで、海水の水分子だけが膜を通して淡水側へ移動する現象が「逆浸透」である。

した海水淡水化プラントが稼働している。難点は、海水中のミネラルや微生物など塩分以外の不純物が膜表面に堆積すると、目詰まり(ファウリング)を起こして造水性能が低下することだ。そのため定期的な洗浄が必要だが、洗浄剤の塩素が膜を傷つけてしまう。また、海水を濾すための圧力をかけるのに大量の電力が必要で、開発途上国・地域への導入が必ずしも十分に進んでいない。汚れに強い丈夫(ロバスト)な膜や、低コストで淡水化できる水処理システムの開発が期待されている。

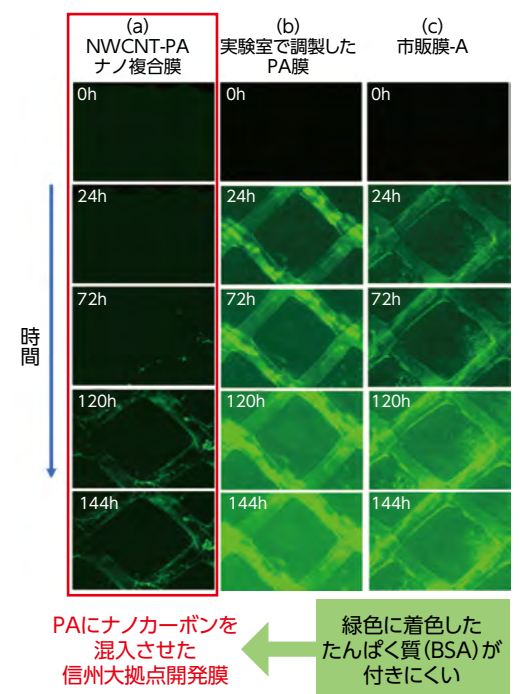
実験と計算機化学の両輪
材料設計の指針に

ファウリング抑制の切り札として期待されるのがCNTだ。通常、RO膜にはポリアミド(PA)という高分子膜素材が使われている。CNTを混ぜるとPAの細孔構造や電子状態が変化して塩分の侵入を防ぎ、より多くの水が通りやすくなる機能が付与される。

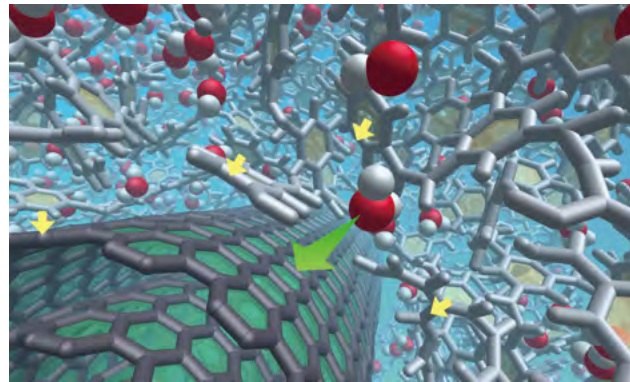
しかし、従来の研究では0.1パーセント程度のCNTしか混ぜることができなかった。CNTをうまく分散させ、PAの中に均一に混ぜ込むのは至難の業だったのだ。

「ごく少量のCNTを混ぜるだけでは、CNTの優れた特性が存分に発揮できません」と遠藤さん。「もっとたくさんの量を混ぜれば、従来の膜に比べて汚れに強く、多くの水を通す丈夫な膜を作れるのではないかと考えました」。CNTの繊維を高度に解きほぐす技術と

従来の薄膜形成技術とを融合することで、独自のナノ複合膜形成技術を編み出し、2015年、PAに従来の100倍以上のCNTを均一に分散させた「ナノカーボン複合RO膜」の開発に見事成功し、特許も取得した。遠藤さんの予想通り、高い耐ファウリング性と水の透過性能を得られただけでなく、耐塩素性も備わって洗浄に強いことがわかった(図3)。製品寿命が長くなるので、維持費用を少なくできる。信州大拠点は2013年の発足以降、このような優れた性能を持つ複合膜について数多くの論文を発表してきた。



■図3
ナノカーボン複合RO膜、実験室で調製したPA膜、市販膜それぞれで耐ファウリング性試験を行い、汚染物質の付着を評価した。緑色部分はファウリングが生じている部分を示す。ナノカーボン複合RO膜へのファウリングは他の2つに比べて著しく少なく、優れた耐ファウリング性を示す。



■図4 ナノカーボン複合RO膜における水分子移動現象。CNTを混ぜるとPA分子がCNTに沿って配列(黄色の矢印)し、水分子はCNTに沿って移動(緑色の矢印)するため透水性が向上する。また、PAからCNTに電子が移動して帯電するため、不純物が膜内部に侵入することを防いで塩分除去率が向上する。



■図5 ナノカーボン複合RO膜の生産ライン。信州大学国際科学イノベーションセンター内に設置されている。

より高性能な膜にするためには、CNTを混ぜると耐ファウリング性や耐塩素性がもたらされるメカニズムの他、水分子やイオンが原子レベルでどのように膜と相互作用しているかを知る必要がある、と遠藤さんは考えた。そこで、複合膜での水分子の精密な挙動を明らかにすべく、スーパーコンピュータでシミュレーションを行った(図4)。

結果、水分子が界面水と呼ばれるナノメートルレベルの薄い層を膜表面に作って覆いとして働き、さまざまな不純物が付着するのを防いでいることがわ

かった。また、CNT周辺のPA分子配列の様子や、膜の孔サイズが小さくなることで不純物の侵入を妨げるなど、材料開発の実験と良く整合する結果が得られた。

「初めて計算機化学を導入し、従来は困難だったナノカーボン膜の複雑な解析や現象の解明に加え、材料設計の指針を速やかに決定できるようになりました。現在は、膜の設計指針を目指して実験と計算機化学の両輪で研究開発を進めています」と遠藤さんは語る。より緻密な材料設計が可能にな

り、今後は多くの水質で安定して性能を発揮できるように膜機能を向上させて、広範な応用を視野に次世代の革新的な水処理膜を完成させる狙いだ。

実用化を目指して パイロット試験を開始

「ナノカーボン複合RO膜はロバスト性が高いので、十分に市場に入り込む余地があります」と都築さんは確信している。実用化に向け、拠点内に設置した製造設備で製品に近い試作を

進めているところだ(図5)。

今年4月には、福岡県北九州市にあるウォータープラザ北九州で、ナノカーボン複合RO膜を使った海水淡水化システムのパイロット試験も開始した(図6)。複合膜をモジュール化してテストプラントに組み込み、システム上の問題点を解決する狙いだ。「海の状態は季節によって大きく変化するため、1年間かけて、パイロット試験を実施していく計画です。実際の海水を使うことで、複合膜の性能の評価と、実用化に向けた課題を明らかにしていきます」と都築さんは意気込みを見せる。

遠藤さんもこのパイロット実験には大きな意味があると期待を寄せている。「実用化できればいいといった中途半端な気持ちでは、企業と『協創』して技術革新を興すことは到底できません。性能やコストなど、企業の厳しい目で価値あるものを作ることが大切です」。試算では、複合膜を用いることで、従来の造水システムより、海水淡水化で37パーセント、再生水で25パーセントの費用削減が期待できる。

地元への貢献も大学の使命と捉えている。「拠点にプラットフォームを設置し、地元企業にも広く参画いただくことで、新たな市場ニーズの発掘にも努めていきます」と都築さん。最近では食品工業における濃縮プロセスへの導入の検討も始まっているという。

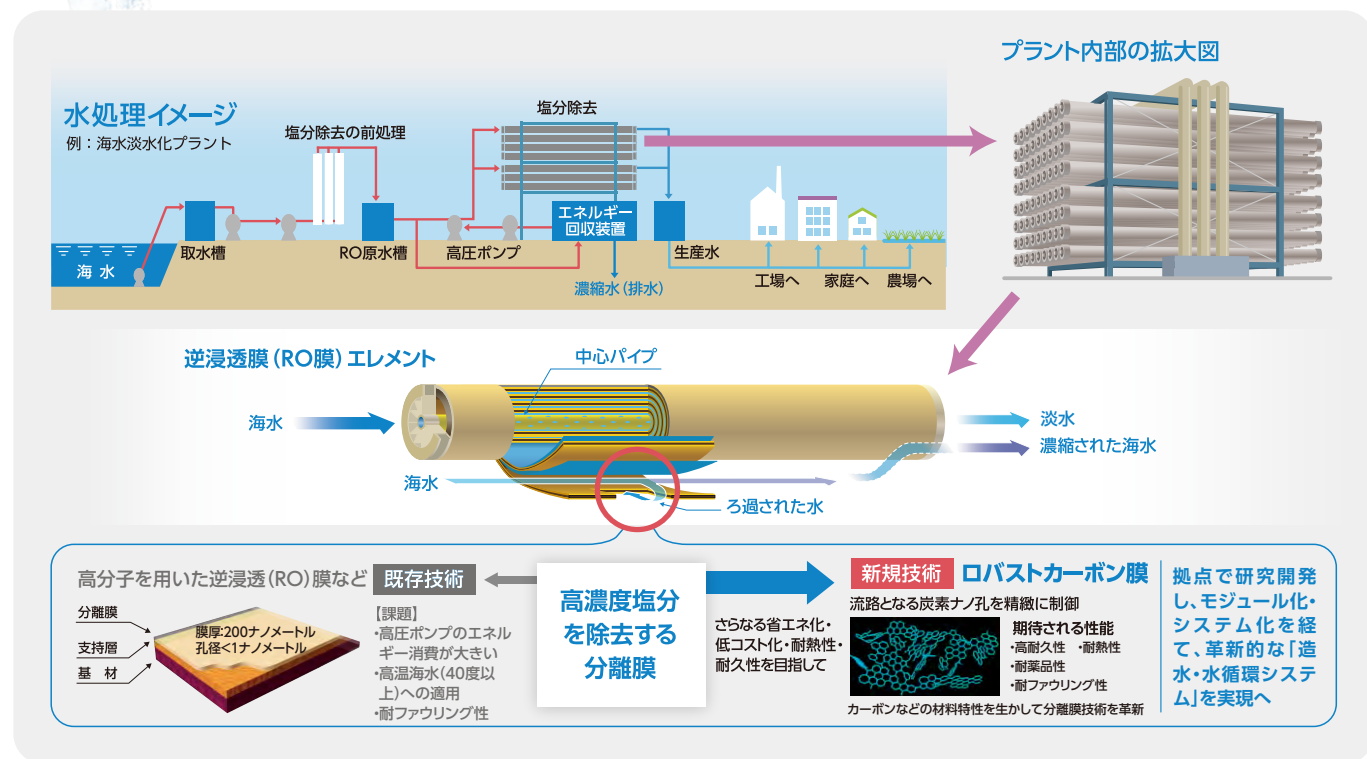
多様な水源を活用 日本発の産業に

今後は海水だけでなく、石油や天然ガスの資源採掘に伴って産出される油分や有機物を含んだ随伴水、湖沼や地下にある塩分を含んだかん水、生活・工場排水、下水などの水処理にも対応すべく、ナノカーボン複合RO膜やナノ材料を使った水処理システムの開発を進めていく計画だ。

一例が、地下水から重金属などの有害物質を除去する溶融塩法によるナノ材料を使った吸着剤だ。2018年からタンザニアで水質調査を行っている(図7)。「タンザニアでは、地層の影響で、一部の地域の地下水にフッ

素が混入し、それを飲んでいた住民に健康被害が生じていました」と都築さんは話す。フッ素はカルシウムと結合するので、骨の成長に影響を及ぼす。同様の問題はインドやバングラデシュなどさまざまな国・地域でも発生している。「信州大拠点の技術を使い、地下水中のフッ素を除去して安全な飲料水を作るプロジェクトを、タンザニアの大学などと共同で始めています。加えて、現地の若者を対象に、安全な水を確保するための科学者や技術者を育成する共同プロジェクトも進めているところだ」。

今後の夢を遠藤さんは熱く語る。「今はとにかくこの水処理システムを早く実用化し、日本発の新産業として確立することを目指しています」。8つもの一級水系の源流域であり、数多くの名水で有名な長野県。「そんな水資源に恵まれた地域に生まれ育ち、水のおいしさを知っているわれわれだからこそ、世界中の人々にきれいで安全な水を届けたいのです」。この強い思いこそが、研究開発の原動力だ。



■図6 海水淡水化のパイロットプラント。長さ約12メートルのコンテナ内に、ナノカーボン複合RO膜モジュールを搭載した海水淡水化装置、膜の耐久性などを評価するための薬品ユニット、水槽などを設置している。最初に汚れを取り除いた後、海水に高い圧力をかけ、膜モジュールに通して塩分を取り除く。

ナノカーボン複合RO膜を搭載したモジュール。断面で黒く見えるのがナノカーボン。



■図7 タンザニアにて、地下水や井戸水の水質調査、現地の学生による浄水実験を実施した。

数字に見る 科学と未来 Vol.11



ひらやま ひでき
平山 秀樹
理化学研究所
平山量子光子研究室
主任研究員
2015年よりALCA
研究開発代表者

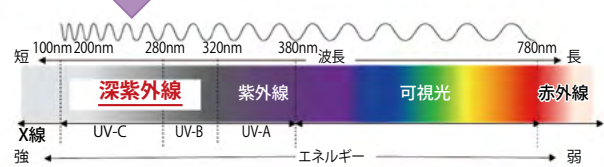
背後にあるのがMOCVD装置。平山さんが自作した装置も含め1号機から7号機までが稼働している。

深紫外LEDの性能向上で 水銀不使用の殺菌灯を目指す

紫外線の中でも波長の短い深紫外線は、殺菌灯などさまざまな分野で利用されている。光源としては水銀ランプが主流だが、水銀を使わず効率良く深紫外線を発生させられるLEDの開発が進められている。その最前線を走るのが理化学研究所平山量子光子研究室の平山秀樹主任研究員だ。

265nm

殺菌に効果のある波長



■図1 光の波長のうち人間の目に見える可視光は380～780ナノメートルの範囲といわれる。紫外線はUV-AからUV-Cまで3つの領域に分類され、UV-BとUV-Cの波長域が「深紫外線」と呼ばれている。265 ナノメートル付近の深紫外線はDNAの吸収ピークにあたり、強い殺菌効果がある。(nm：ナノメートル)

紫外光源で青色LEDに続け

長年実現が困難とされてきた青色LED(発光ダイオード)の発明は、省エネルギー・長寿命の照明やディスプレイなどを生み出し、世界を大きく変えた。次なる研究フロンティアの1つが、青色よりさらに波長の短い紫外線を生み出すLEDだ。

紫外線の中でも特に波長の短い深紫外線は高い殺菌能力を持ち、工場や浄水場などでの使用が期待されている(図1)。現在使われている殺菌灯の多くは水銀を使用しているが、2017年に「水銀に関する水俣条約」が発効するなど国際的に水銀の使用削減が進む中、深紫外LEDへの置き換えに大きな期待がかかっている。深紫外LEDを利用した製品も市販され始めているが、発光効率、出力ともに不足しているのが現状だ。

1996年から紫外LEDの研究を始めた平山さんは「開発競争は熾烈ですが、私たちは深紫外LEDで20.3パーセントという世界一の発光効率を達成しました。しかし、普及には殺菌灯として使わ

れている低圧水銀灯の発光効率を超える必要があり、現在は30パーセント超えを目標にしています」と意気込む。

LEDは、電子が多いn型半導体と、電子が不足している(正孔を持つ)p型半導体が接合(pn接合)した基本構造を持つ。電圧をかけることで、電子と正孔が結合して発光するが、半導体の種類によって光の色(波長)や、発光に必要な電圧が異なる。求める波長の光を発生させる半導体の開発を目指し、多くの研究者がさまざまな材料を探索してきた。「紫外領域の光が出せるだけでは実用化はできません。従来の光源よりも効率よく発光し、低コストで量産できる必要がありました」と平山さん。有望な材料として期待されたのが窒化アルミニウムガリウム(AlGaIn)だったが、課題は多かった。

きれいな結晶をつくる新技術

LEDでは、土台となる物質(基板)の上に原子が規則正しく並び結晶を成長させてpn接合をつくる。半導体の基板

には安価なサファイア(Al_2O_3)が使われるが、結晶を構成する原子と原子の距離(格子定数)が異なるため、AlGaIn結晶を成長させるとゆがみが生じ、格子欠陥と呼ばれる傷が生じる。そこから線上に広がった裂け目は結晶欠陥と呼ばれ、その密度(貫通転位密度)が高まると発光効率は低下してしまう。

青色LEDでは基板上に欠陥の少ない窒化ガリウム(GaN)結晶を製膜することが必要で、これを可能にしたのがノーベル賞を受賞した赤崎勇名城大学終身教授だ。一方、深紫外LEDでは、基板上に窒化アルミニウム(AlN)結晶を製膜し、さらにその上にAlGaIn結晶を成長させる。平山さんは基板上にAlNを高品質に製膜し、欠陥を減らす手法を確立した。「この手法の発明は発光効率の向上に向けたブレークスルーとなり、ライバルだった米国の研究チームの一步先を行くことができたのです」と振り返る。

AlN結晶は有機金属気相成長法(MOCVD)と呼ばれる方法でつくる。約1400度の高温下でサファイア基板にガス状の材料を供給し、結晶として成

長させる。開発した方法では、基板上に核となる窒化AlNをまず成長させ、アンモニアガスをパルス状に吹き付け、核と核の間を埋めるように横方向に成長させる。続いてガスを連続供給し、縦方向に積層させる。これを繰り返すことで、ひび割れのない高品質のAlN層ができる(図2)。「きれいな結晶をつくるには、ガスの濃度や流量、反応温度などを細かく制御する必要があります。高温ではガスの流れが乱れやすく、さまざまなノウハウが必要となるため、装置を半自作し改良を加えています」。

構造の工夫で発光効率を改善

発光効率には3つの要因が関係する。1つ目が「内部量子効率」、2つ目が「電子注入効率」、3つ目が「光取り出し効率」だ。平山さんはこれら3つの効率の向上を目指した。

内部量子効率とは、電流によって発生した電子と正孔の対の何割が発光するかを示す値で発光層がどれだけうまく光るかを示す。これは結晶をきれいに成長させ、欠陥を減らすことで向上に成功した。

電子注入効率は、注入した電流のうち発光層に注入される電子の割合を指すが、従来の深紫外LEDでは発光層ではなくp層側に漏れ出してしまうという問題があった。

「原因はp型を持つ正孔とn型を持つ電子の数が釣り合わないことでした。正孔を増やすことは難しいので、結合せずに通り抜けた電子を反射させる電子ブロック層(多重量子障壁)をつくることで効率的に結合させることに成功しました」と平山さんは説明する(図3)。この結果、電子注入効率は大幅に向上したという。

目下の課題が、発光領域で発生した光のうち何パーセントが外部に取り出せるかを示す、光取り出し効率だ。発生した光がデバイスの構造内部で吸収されないよう、光をうまく外に取り出す方法を検討している。難しい課題だが、すでに解決への糸口はつかみつくと平山さんは話す。

「光取り出し効率が低い最大の要因

は、発生した深紫外線がコンタクト層で吸収されてしまうことでした。そこでコンタクト層で吸収される前に反射させて、吸収を防ぐのです」。

コンタクト層内部に高い反射率を持つフォトリソグラフィを採用し、光を取り出す側にはサファイアレンズを取り付けた。また、光の散乱効果を使ってサファイア基板で反射される深紫外線を減らすため、基板に加工を施した。これらの工夫により、10パーセント以下だった光取り出し効率はその5倍程度まで向上することがわかった。将来はサファイア基板を剥がし、光を取り出すために窒化アルミニウムの柱状構造を設ける予定で、シミュレーションでは光取り出し効率は70パーセントに達することが見込まれている。

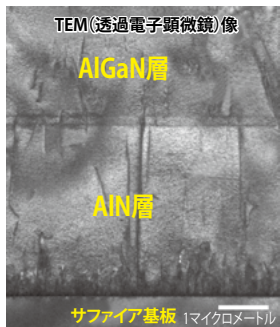
発光効率に関わる3つの要因にアプローチしたことで、低圧水銀ランプを超える発光効率の実現が視野に入ってきた。

夢はレーザー光源への応用

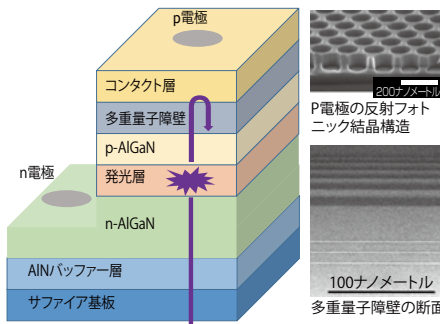
AlGaInを使用して開発した深紫外LEDには、応用範囲の面でも利点がある。「結晶の組成を変えることで深紫外線の波長を調節できることも特長で、これまでに222～351ナノメートルの帯域で深紫外LEDを実現しました。アトピー性皮膚炎や乾癬などの治療に使用される310ナノメートル付近の光など、用途に応じて必要な波長の深紫外線を自由につくることができるのです」と目を輝かせる(図4)。

まだ開発途上の技術で出力については現在の数十ミリワット程度から数ワットまで向上させる必要があるものの、殺菌、浄水、空気浄化、医療、生化学産業、樹脂硬化・加工、印刷、塗装などさまざまな分野での活用が期待されている。

「将来はより大きな出力を実現できる深紫外レーザーダイオード(LD)を開発したいと考えています。実現すれば、Blu-rayディスクを超える大容量の記憶メディアや有害物質の分解も実現できるでしょう」と平山さんは先を見据える。深紫外LED開発のフロンティアは、まだまだ大きく広がっている。

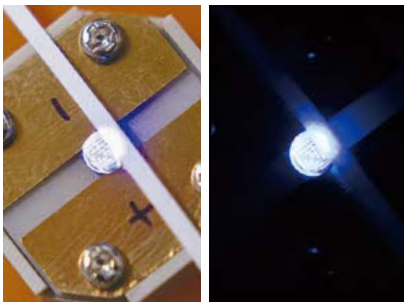


■図2 透過電子顕微鏡で観察すると、AlN層の成長の初期層では、結晶の転位密度が高いが、上に成長していくに従い、きれいな結晶になっていることがわかる。AlGaIn層では転位密度は低い。



深紫外線を取り出す

■図3 発光効率向上のため、多重量子障壁で電子を反射させ無駄なく発光層で再結合させる、コンタクト層を透明化して光の吸収を抑えたり、高反射フォトリソグラフィで反射させたりして光を効率的に取り出すといった工夫を凝らした。



■図4 270ナノメートルの深紫外線を発生する深紫外LED。2014年には殺菌用途で市販化された。



深紫外LEDの実用化への道筋を拓いたことが評価され、第9回半導体エレクトロニクス業績賞(赤崎勇賞)を受賞した。手に持っているのが受賞トロフィー。

戦略的創造研究推進事業さきがけ
研究領域「超空間制御と革新的機能創成」
研究課題「ナノ超空間中の流動を利用した吸着と結晶化制御による新機能開拓」

研究
成果

素材に微細な傷を付けて色や形を表現 インクを使わず超高精細に印刷

コガネムシの表面やクジャクの羽などに見られる鮮やかな色は「構造色」と呼ばれ、色素ではなく特殊な多層構造が光を反射して発色しています。

京都大学高等研究院物質－細胞統合システム拠点のイーサン・シバニア教授らはこの仕組みに着目しました。素材の表面に人工的に微細な発色構造を作り出し、インクを使わずに色を付ける方法を開発しました。

アクリル樹脂やポリカーボネートといった安価な工業用ポリマーのシートに光を照射し、酢酸などの溶液に浸すことで人工的に小さな亀裂を生じさせ、構造色と同じ多層構造を作ること成功しました。光の波長を調整すれば、青、赤、黄など、表現したい全ての可視光を発色できます。この技術によって、通常の印刷と比べ40倍の解像度を達成し、指先よりも小さく透明な素材上に高精細な印刷を可能にしました。また、インクを使わないので色褪せず、環境への負担も少なくなります。

以前から構造色を使った印刷技術はありましたが、高価な材料が必要でした。開発した方法は、安価な素材を

使い、また、光の照射にも特別な装置が必要ないため、さまざまな用途が見込めます。

インクの使用量の削減の他、紙幣や身分証明書などの偽造防止技術への活用などに広く普及させることを目指します。



インクを使わずに印刷された絵画。光を照射した部分に多層構造が形成され、発色により絵を描くことができる(左)。光の当たり方によって色が変わって見える(右)。

戦略的創造研究推進事業 × 未来社会デザイン・オープンプラットフォーム(CHANCE)
さきがけコンバージェンス・キャンプ

開催
報告

研究がもたらす未来や社会的意義を さきがけ研究者と企業が共に議論

研究者が分野を超え共通のゴールを見据えて連携し、環境問題や高齢化など、より大きなスケールの社会的課題に挑む「コンバージェンス研究」。近年、日本で新たな基礎研究の萌芽を促すためにも重要になっています。これが発展していくには、多様な視点が交わり新たな発想が生まれる場が必要です。

若手の基礎研究を支援するプログラム「さきがけ」では、コンバージェンス研究へつながる発想を得ることを目指し、「若手トップサイエンティストと考える新しい社会のデザイナー-さきがけコンバージェンス・キャンプ」を開催しています。産官学民が連携する「CHANCE」構想と連動した取り組みとして企画されました。

5月に開かれた第2回目には、23の企業、団体から38人が参加。さきがけ研究者7人が「植物の魅惑的な生殖世界」「大気汚染と脳疾患の関連をひもとく」などテーマを提供した後、参加者は関心を抱いた研究者のテーブルへ移り、その研究がもたらす未来について異業種、異分野のさまざまな視点からオープンに語り合いました。研

究者からは「今まで考えたこともなかった分野で自分の研究が生かせることに気が付いた」、企業からは「研究者と『混ざる』ことが画期的で価値があった」など、参加者には多くの気づきがあったようです。これをきっかけにした、コンバージェンス研究への展開が期待されます。



研究者と参加者がテーブルを囲み語り合う様子。

さきがけコンバージェンス・キャンプの詳細はこちら
未来社会デザイン・オープンプラットフォーム(CHANCE)
<https://chance-network.jp>



戦略的創造研究推進事業さきがけ
研究領域「量子の状態制御と機能化」
研究課題「プログラマブルなループ型光量子プロセッサの開発」

研究
成果

光を用いた量子コンピューターの心臓部を開発 1つの回路を繰り返し使用し多くの計算処理が可能に

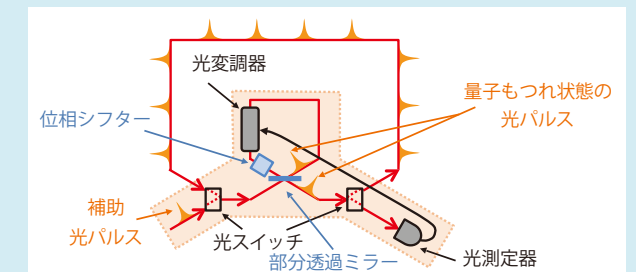
量子力学の原理で計算する量子コンピューターは、特定の計算をスーパーコンピューターよりも格段に短い時間で実行でき、世界各国で研究開発が進められています。中でも光を使う量子コンピューターは大気中で動作し、巨大な冷却装置なども不要なため、実用化に優れています。

しかし従来の手法では、実行したい計算の種類ごとに異なる回路が必要な上、計算の規模が大きくなるほど装置も大型化してしまう問題があり、実用レベルで計算できるほどの大規模化は難しいと考えられてきました。

東京大学大学院工学系研究科の武田俊太郎特任講師と古澤明教授らは、一瞬だけ光るパルス状の光を操作し、大規模な計算を効率良く行える回路を構築しました。この回路は2017年に発表した「究極の大規模光量子コンピューター」方式の心臓部となるものです。

1つの回路を繰り返し使いながら次々と入ってくる光パルスの入射するタイミングに合わせて、ミラーの透過率や位相シフターの設定を高速に切り替える制御方法

を開発しました。この方法では、回路の規模と構造を変えずに機能を切り替えるだけで、さまざまな量子もつれを効率良く合成できます。実際に、1000ステップを超えるさまざまな種類の計算が実行できるようになり、究極の大規模光量子コンピューターの実現に大きく前進しました。



究極の大規模光量子コンピューター方式。オレンジの点線で示した部分が今回構築した心臓部の回路。情報を乗せた多数の光パルスは、一列に並んでループを周回する。1つの回路を機能を変えながら繰り返し利用し、何ステップも計算を行う。計算の過程で、次々と来る光パルス同士を順次適切な量子もつれ状態にしている。

産学連携展開部
イノベーション・ジャパン2019～大学見本市＆ビジネスマッチング～

イ
ベ
ン
ト

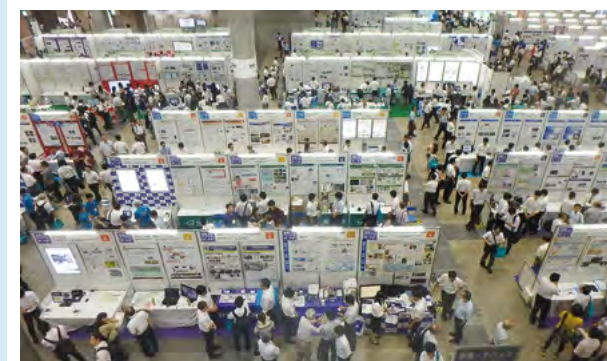
国内最大規模の産学マッチングイベント イノベーション・ジャパン2019開催迫る

大学やベンチャー、中小企業などが500を超える研究開発成果を展示、発表する、国内最大規模の産学マッチングイベント「イノベーション・ジャパン」。今年は東京ビッグサイト 青海展示棟(東京・青海)で開催します。

基調講演では、「温泉博士」「お風呂博士」の愛称で知られる東京都市大学の早坂信哉教授が、研究テーマである入浴、温泉を通じ数多くの自治体や企業などと協働した経

験から、オープンイノベーションに踏み出すためのヒントを紹介しします。特別講演では、名古屋大学の松尾清一総長が「大学改革と本格的産学連携」をテーマに、大学改革として取り組んでいる1法人複数大学制度が地域にもたらす効果と産学官連携のあり方、そして地域のイノベーション創出における大学の役割について展望します。

公式サイトで来場の事前登録を受け付けています。



昨年の来場者数はのべ1.4万人を超えた。



「お風呂博士」こと東京都市大学の早坂教授(左)と名古屋大学の松尾総長(右)が登場。



イノベーション・ジャパン2019

開催日：8月29日(木)～30日(金)

会 場：東京ビッグサイト 青海展示棟Bホール

入場料：無料

主 催：科学技術振興機構(JST)、
新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)

Q1 印象に残っている言葉は？

A1

今よりも、もう少し
「先」を見なさい

小学生の頃から社会問題の解決に貢献したいと漠然と思っていました。高校生の時、エイズやエボラ出血熱が世界的な問題となっていて、これを解決したいと、空気感染の研究者がいる大学へ進学しました。エボラ出血熱の研究をしている先生に相談に行くと「その問題は今、多くの人が認識している。あなたが研究者になる頃にはある程度解決されているから、もう少し先の問題を見なさい」と諭され、一瞬にして目標を見失いました。何をを目指したらいいかわからなくなったのですが、学会などでいろいろな人の話を聞くことになりました。中でも偶然参加した学会で植物の重要性に興味を持ち、この世界に飛び込みました。大学院で始めた植物内の情報伝達の研究が、今の研究につながりました。出合ったことを運命と思い、テーマの重要性や可能性を発信していくことを大切にしています。

Q2 研究テーマを一言でいうと？

A2 接ぎ木の仕組みを解明し、
食料生産に貢献

接ぎ木は異なる植物をつなぎ、それぞれのいいところ取りをする技術です。2000年以上の歴史があり、生態や自然環境への影響も少なく農業には不可欠となっています。ただし、異種の植物同士では拒絶反応などが起こり、遠縁だと接ぎ木はできないと考えられていました。それが可能であることを偶然発見したのは留学中のことです。研究費不足で思うような研



さきがける 科学人

vol.88

出合ったものを
運命と思い
大切に伝えていく

名古屋大学 生物機能開発利用研究センター
准教授

野田口 理孝

Michitaka Notaguchi

Profile

東京都出身。2009年 京都大学大学院理学研究科博士課程修了。博士(理学)。カリフォルニア大学研究員やERATO東山ライブホロニクスプロジェクト研究員、名古屋大学大学院理学研究科特任助教、JSTさきがけ研究者、名古屋大学大学院生命農学研究科助教を経て、19年より現職。



究ができない中、どうにか成果を出さなければと、手元にあった植物を手当たり次第にモデル植物であるタバコに接ぎ木したところ、遠縁の植物とつなぐことに成功しました。今は、植物科学の知見を背景に接ぎ木技術を改良するなど、品種改良や育種作業をより早く簡単にするための研究を進めています。地球温暖化の影響で、将来、食料危機が起こるといわれています。この技術が気候変動に伴う地域ごとの環境負荷の問題を解消し、持続可能な農業と食料生産に貢献できると考えています。

Q3 今後の目標は？

A3 植物の声を聞く技術を
開発したい

農業分野では、植物工場や厳しい自然環境で植物の栽培体系をどう作っていくか、新しい挑戦が始まっています。植物にも「今、花を咲かせてもいいのかな」「ここ、虫に食べられた」など、自身が置かれてい

る状況を判別する機能があることがわかってきました。葉っぱが虫に食べられていることを他の葉や花に知らせる時に、植物の体内ではある物質が働いています。それを検出できれば、水や栄養が足りているのか、栽培方法に満足しているのかなど、植物の声を聞けるかもしれません。コミュニケーションから相手を知ることは大切です。将来、「この方法、とてもいいよ」と栽培方法を植物に直接聞くことができる、こうした技術を開発していきたいですね。

休日は子供たちを連れて野山に出かけています。子供たちも自然に興味を持ってくれたらと願っています。

