



JST ** * O S < N P H M

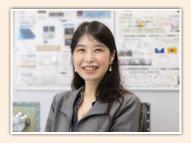
2023 July





03 特集1

高機能触媒の開発でプラごみ問題を解決 環境に優しい「ケミカルリサイクル」へ



08 特集2

資源循環型の社会目指し新技術を開発 低負荷・低コストで完全分離を実現

12

〈連載〉イノベ見て歩き

- 第2回 -

地震で崩壊した熊本城の石垣修復を支援 3Dデータによる独自の画像照合技術で



14 NEWS & TOPICS

>> 約2.5億年前の大量絶滅 火山活動の痕跡捉える

>> 失明すると触覚が鋭敏になる仕組みを解明

ほか

16

さきがける科学人

「脳の個性」に合わせたリハビリ神経工学の技術駆使し提案めざす

産業技術総合研究所 情報·人間工学領域 研究員

笠原 和美



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 株式会社エフビーアイ・コミュニケーションズ

■ 印刷・製本 株式会社丸井工文社



高機能触媒の開発でプラごみ問題を解決 環境に優しい「ケミカルリサイクル」へ

近年、SDGsやサーキュラーエコノミー(循環経済)へ向けたプラスチックごみ問題解決の背景から、プラスチックの分解再利用に関する研究の重要性が高まっている。この問題に際し、東京都立大学大学院理学研究科の野村琴広教授は、独自の高性能触媒を用いた研究開発を通じ、環境負荷の低いケミカルリサイクルの確立を目指している。

現状は品質やコストに問題カルシウムとチタンで活路

使用済みのプラスチックを原料に 戻す「ケミカルリサイクル」は、プラスチックごみ問題を解決する技術と して期待されている。しかし、現在この手法が利用されている割合はプラごみ全体のわずか3パーセント程度 にすぎない。例えば、ペットボトルをケミカルリサイクルするためには、 高温下で多量の酸や塩基、添加物が必要で、反応後の目的物の回収や廃水処理の問題、副生するポリマー原料以外の化合物の分離・精製などの課題がある。

「現状では、リサイクル品の品質やコストの問題があり、石油から作った方が安いという現実があります」と語るのは、東京都立大学大学院理学研究科の野村琴広教授だ。野村さんはJSTのCREST「機能集積型バ

イオベースポリ マーの創製・分 解・ケミカルリサ イクル | におい て、ポリエステル とアルコールを 混合、加熱するだ けで原料へ分解 できる高性能の 酸化カルシウム 触媒とチタン錯 体触媒を開発し て活路を開いた。 チーム内の東京 農工大学工学研 究院応用化学部 門の平野雅文教 授とは、別の触媒 開発にも取り組 んでいる。

この研究はも ともと野村さん が研究代表者を 務めるSICORP (e-ASIA JRP) 「触媒的効率炭素 ー炭素結合形成を基盤とする植物油由来の高分子機能材料の開発」での、非可食植物油から洗剤やポリマーの原料など付加価値の高いファインケミカルズの合成を可能とする触媒開発で、2つの触媒を見いだしたことから展開したものだ。「植物油からポリマーを合成するエステル交換反応のポリマーの分解に適用するという至ってシンプルな発想です」と野村さんは語る。この成果はCRESTの研究開始から1年足らずでの成果発表となった。

触媒材料が、酸化カルシウムとチタン錯体である点にもメリットがある。酸化カルシウムは入手が容易かつ安価な市販の触媒で、工業化実績が豊富である。チタン錯体も入手が容易で、触媒性能に優れている。そのため、ポリエステルとアルコールを取り除混ぜて加熱し、アルコールを取り除

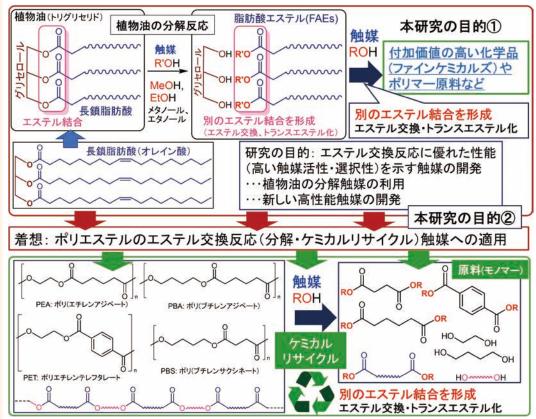
くと原料を100パーセント回収できる。シンプルかつ高効率ゆえに環境 負荷の低いプロセスを構築できる可能性が高い。

また、エステル交換触媒であるチタン錯体は分解反応後もそのまま残っているため、真空でアルコールを除きながら反応させることにより、いったん原料に分解されたポリエステルに戻る。つまり、廃プラスチックから新たなプラスチックへ触媒を変えることなく変換できるのだ(図1、2)。この方法は、植物油からポリマー原料の生成、各種精密化学品の合成、プラごみから付加価値の高い化学品への変換など、幅広い応用も期待される。

企業・米国での経験を礎に 独自性を意識しながら研究

野村さんが分子触媒化学の研究に

図 本研究における「ケミカルリサイクル」の目的と着想



植物油に多く含まれる脂肪酸エステルから付加価値の高い化学品を合成したり、プラスチックを原料へケミカルリサイクルしたりする高性能触 媒の開発を目指している。

「触媒的効率炭素-炭素結合形成を基盤とする植物油由来の高分子機能材料の開発」

最初に取り組み始めたのは、博士前期課程からだという。「前期課程修了後は住友化学の有機合成研究所に入社し、ファインケミカル合成の触媒開発に従事し、その成果を論文発表して博士号を取得しました。この間、触媒探索からプラントでの実用化までを担当しました。同じ分野の先生方とはまったく異なる歩みかもしれません」。

その後、米国のマサチューセッツ工科大学(MIT)に留学し、ノーベル化学賞受賞者のリチャード・シュロック教授の研究室で、現在欧米で活躍する多くの研究者と研究活動に取り組んだ。企業や米国での10年間の経験と、そこでの研究者たちとの出会いが、野村さんの研究生活の礎となっている。帰国後は石油化学品の研究所に所属し、エチレンなどのオレフィン重合触媒の実用化研究と触媒探索に携わった。

1998年に奈良先端科学技術大学院大学に着任した野村さん。当時、研究者としてのロードマップを特に意識していたという。「この先も研究者として生き残るためには、自身の発想でオリジナリティーの高い触媒を設計・合成して、その触媒でないと実



2015年、米国ボストンで開催された研究室のOB会での写真。前列の右端が野村さん、左から2番目がシュロック教授。

現できない研究を推進することが大事だと考えました」。同時に、今回の課題で採択されたように「独自の精密合成技術を拓いて、その特徴を生かした材料開発への展開」を考えるようになったという。

そこで、研究テーマの中心に「独自の高性能触媒の設計・創製」を据え、チタンやバナジウム・ニオブ分子触媒を開発した。時間は非常にかかったが、これらの触媒でないと実現できない反応例を数多く発表することができた。こうした野村さんの姿勢

と数々の研究成果が評価され、96年には日本化学会の技術進歩賞、01年には触媒学会の学会賞・技術部門を受賞した。さらに19年には同学会の学会賞・学術部門も受賞している。

タイ、フィリピンと共同採択 非可食植物油の活用に挑む

その後、野村さんは10年より首都 大学東京(現・東京都立大学)の教授 に着任。研究室はタイのチュラロン コン大学やマヒドン大学、タマサート大学とのつながりが強く、これまでに数多くの留学生を受け入れ、共著論文も多数発表してきた。バンコクでの国際会議も共同企画・開催究を模索していたところ、タイ側からの紹介でフィリピンのアテネオ・デ・マニラ大学を加えて、非可食植物油から触媒反応で高分子機能材料を合成することをテーマにe-ASIA JRPへ応募、採択された。

e-ASIA JRPでは、非可食植物油から化学品を効率よく合成する触媒開発をタイと日本が共同研究し、バイオベースポリマーの合成を日本、そのバイオポリマーの機能評価をタイとフィリピンが担当した。その後、e-ASIA JRPの成果の1つであるエステル交換反応の触媒開発を、

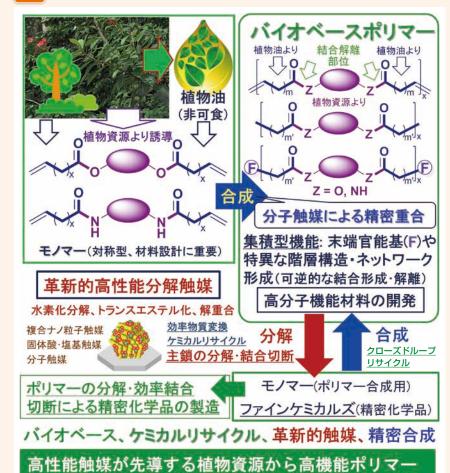
図2 ポリマーの分解反応





市販のPETボトル片とエタノールにチタン触媒を加えた状態(左)。反応後の様子、原料のテレフタル酸ジエチルの白色沈殿が見られる(右)。ポリマー原料が定量的に回収できる。

図3 CRESTの研究概要



の合成・分解・ケミカルリサイクルの資源循環の提案

CRESTの課題に適用し、プラスチックの分解という成果につながった。

CRESTの主目的は、植物資源から 誘導される高機能ポリエステルの開 発とケミカルリサイクルだ。「分解は

サイクル可能な高分子機能材料の創製を目指す研究は世界中で行われている。「ジェット燃料などに展開する研究と比較すると、ポリマーへの展開に取り組む研究者は日本では少な

いと思います」と野村さんは研究の 肝を語る。

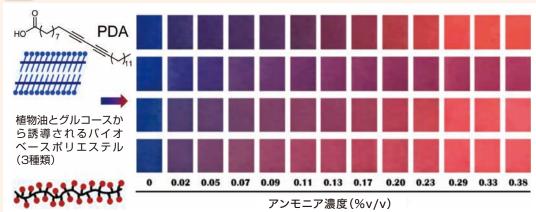
多様な機能性を発揮する 材料開発の可能性を提案

現在、野村さんは精密合成手法の開発に加えて、機能開発に関する研究にも取り組んでいる。きっかけはe-ASIA JRPでの国際共同研究だ。合成したポリマーをタイの研究室で機能評価したところ、アンモニアやエチレンなどを検知するセンサーとして機能することがわかった(図4)。この発見を契機に、食品包装用フィルムとして、食品容器の鮮度センサーに利用できないかとタイ側で研究を進めている。

フィリピン側では、合成した糖鎖ポリマーとキトサンとの複合化フィルムで水中に混在する水銀などの捕捉効果が見られたので、水質浄化膜の開発を目指している。「こうした実用につながる発想は日本チームだけではできませんでした。国際共同研究ならではの成果ではないかと思います」と国際共同研究の重要性を強調する野村さん。

ただ、ASEAN諸国との共同研究は必ずしも順風満帆ではなかった。19年に発生した新型コロナウイルス感染症の拡大により、各地で都市のロックダウンが実施されたためだ。

図4 センシング機能を持つ(PDAとバイオベースポリエステルからなる)ポリマー複合材料



ポリジアセチレン(PDA)を基に合成したポリマーを検証した結果、食品の腐敗や追熟に影響を与えるアンモニアやエチレンを検出するセンサー機能を持っていることがわかった。

「触媒的効率炭素-炭素結合形成を基盤とする植物油由来の高分子機能材料の開発」

「サンプルを海外へ送るにも大学が閉鎖されていたため、海外の共同研究者の自宅に送るなどして対応しました。本当は海外の学生に来ががったのですが、それも延期となりました」と野村さんは振り返る。

一方で、コロナ禍ならではの機会やコミュニケーションツールをフル活用した。「すでに研究方針を固めて、研究チーム間で共有できていたので、ウェブ会議で

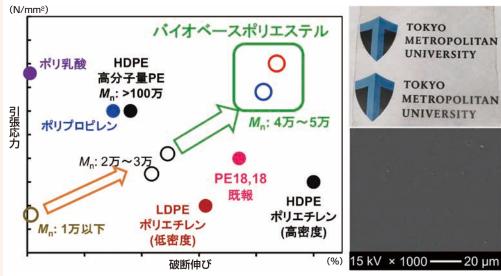
も十分に意思疎通を図ることができました。これまでは距離や時間の制約が多くありましたが、さまざまな学会や国際会議にオンラインで出席することもできました」。さらに、自由に使える時間が増えたことで、研究に関連する幅広い分野を勉強することもできたという。

ポリマー鎖を長くして 実用化の壁を越えたい

プロジェクトを進めるにあたって 課題の1つとして、野村さんはポリマーのさらなる高分子化を挙げた。 「私たちの研究は合成手法や触媒に 着目しています。合成したポリマーを 実際の材料として使うためには、ポリマー鎖を長くする必要があります」。 この課題に対し、植物油とグルコースから誘導される各種モノマーのオレフィンメタシス重合に注目した。

高分子量ポリマーを合成する手法開発に取り組んだ結果、汎用のポリエチレンより引張強度や破断伸びに優れる材料が得られるようになった(図5)。この成果はチーム内の大阪産業技術研究所の平野寛先生との共同研究から生まれた成果で、分解・リサイクル可能なバイオベース高機能材

図5 バイオベースポリエステルの機械特性



課題で合成したバイオベースポリエステルの機械特性と汎用材料との比較(左)。引張特性への顕著な分子量効果が見られる。調製したフィルムの写真(右上)と走査型顕微鏡(SEM)画像(右下)。

料の研究を進める重要な基盤技術となっている。

この課題と並行して、独自に開発したバナジウムやニオブ錯体触媒について、研究を進めている。「他の触媒と比較して触媒活性、耐熱性、選択性の制御など有効性が実証されていますが、この課題に適用するにはまだまだ改良が必要です。将来的には、これまで取り組んできた独自の触媒開発、材料開発などが、1つの線でつながるような結果として結実すればと期待しています」と野村さんは展

望を語る。

この分野の触媒開発の研究は、欧米などの海外に研究者が多く、野村さんは今よりもさらに積極的に国際共同研究を推進したいと考えている。また、海外では関連触媒で実用化に至った例はいくつかあるが、国内ではなかなか実用化の壁を越えるのが難しいのが現状だ。野村さんは、これまで培った経験に加え、幅広い分野の知見を積み重ねることで、この壁を乗り越えようとしている。

(TEXT:伊藤左知子、PHOTO:石原秀樹)





資源循環型の社会目指し新技術を開発 低負荷・低コストで完全分離を実現

新規電気パルス法を開発 循環経済への展開後押し

リチウムイオン電池の正極材活物質をアルミ(AI)集電箔の両面に接着剤でつけた試料に、瞬間的に高電圧をかけると、「バチン!」という大きな音と共に真っ黒な粒子が剥がれ落ちる。この分離は「新規電気パルス法」という技術を用いて実現される。黒い粒子となった正極材活物質は、元素としての有用性が高いニッケル(Ni)やコバルト(Co)などの酸化物で、再利用もできる。

研究開発を進めるのは、早稲田大学の所千晴教授だ。現状のリサイクルは、廃棄物を破砕・粉砕・選別し、化学的な処理で金(Au)などの高価な

ものを取り出して再利用している。 しかし、これだけだと元素として経済的に価値のあるものしか資源循環できないのが実情だ。「そこで、より精度の高い革新的な分離技術が必要だと思いました」と開発のきっかけを語る。

所さんが目指すのは、サーキュラーエコノミー(循環経済)への展開だ(図1)。これは、いわゆる3R「リユース」・「リデュース」・「リサイクル」に加え、廃棄物を原料として再利用することで、循環的に資源を使い続けるようにする経済モデルのことだ。従来は自然資源を使い捨てにして、廃棄物を排出していたところを、処理する流れに沿って物の価値を余すことなく使う。

LIBも現状、その循環を可能にする良い分離技術はないという。正極材活物質を抜き出すには、焼却・粉砕後に物理的に選別するか、あるいは解体・洗浄した上で粉砕するかのどちらかになる。いずれにしても、環境負荷は大きく、コストもかかる(図2)。これに対して所さんが目指すのは、回収以降のプロセス変革である。革新的な物理的分離を経て、素材・部材にまで至る道筋を作るのが目標だ。これを後押しする技術こそ、冒頭で紹介した新規電気パルス法なのだ。

現状の分離技術は、大きく分けて 作業性と選択性の2つの軸がある。機 械を用いた破砕・粉砕は、作業効率は 高いが、必要なものだけを抜き出す 選択性に欠ける。一方で、人力の選別

では作業効率は低いが、選択 性は高い。その両極の間に、 水中に固定された電極に試 料を挟み、放電により衝撃波 を与えることで、界面を選択 的に破壊する従来の電気パ ルス法が位置する。新規電気 パルス法は、従来の電気パル ス法の作業性と選択性の向 上を図った手法で、二酸化炭 素(CO2)の排出量も抑えら れる点が革新的である。

研究開発を進めるにあた り、JSTの未来社会創造事 業を利用した。重点公募テー マである「新たな資源循環サ イクルを可能とするものづ くりプロセスの革新」に採択 され「製品ライフサイクル管

理とそれを支える革新的解体技術開 発による統合循環生産システムの構 築 | の研究開発を開始した。所さんは 2017年11月から探索加速型研究を 進め、19年からは社会実装に向けた 本格研究に取り組んでいる。

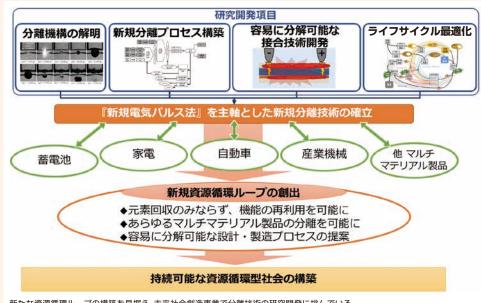
厄介なマルチマテリアル化 分解しやすい設計を意識

所さんは、製造側にも資源循環を 重要な課題として認識してもらい、 最終的には設計概念の変容のきっか

けを作れるのではないかと考 えて事業への応募を決めた。 「産業界では今、高機能・低コス トが求められる中で、製品のマ ルチマテリアル化が進んでい ます。分離する過程で、必要な エネルギー・コストが増えるの で循環利用は困難です」。マル チマテリアル化が進むほど拍 車がかかる既存工程は、環境と 経済双方の観点から好ましく ない。

一方で、時代の要請に応じ て、企業側の姿勢にも変化が見 え始めていると所さんは感じ ている。「SDGsの達成やカー

図 未来社会創造事業(所課題)のロードマップ

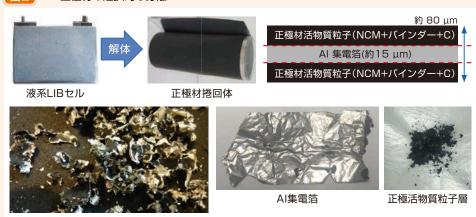


新たな資源循環ループの構築を見据え、未来社会創造事業で分離技術の研究開発に挑んでいる。

ボンニュートラルの実現、サーキュ ラーエコノミーの構築が求められる 中、企業側にも資源循環に対する意 識が芽生え始めています。あらかじ め分解しやすい製品を作ることの重 要性が認識され始めているのです」。 こうした意識の変化は「インバース・ マニュファクチャリング |という言葉 にも表れている。これは、使用済み製 品の「回収・分解・選別・再利用」という 流れを踏まえた上で、設計・製造する ことを意味する。これこそまさに、所 さんが実現したい「容易に分解可能 な設計・製造プロセス」だ。企業側は、 「環境 | 「経済 | の判断軸だけでなく 「社会」という判断軸からも生産活動 を捉えるようになってきたのだ。

単なる処理側の技術開発だけでは なく、企業側の設計・製造概念の見直 しや新たな資源循環ループの創出に つなげたい。全国各地の大学だけで なく、大手企業が参画する研究体制 の構築にも、その思いは表れている。 実現するには、技術という視点以外 からの評価が欠かせない。「新技術を 用いたプロセスやシステムをライフ

図2 LIB正極材の選択的な分離

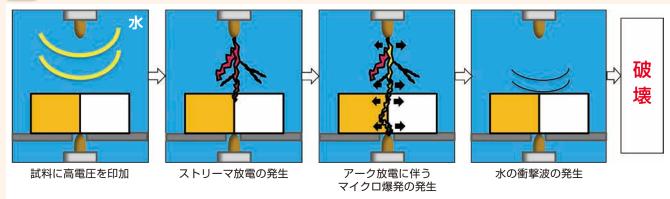


従来法による分離

新パルス法による分離

LIBの再生利用のためには、正極活物質をAI箔から分離することが不可欠だが、従来の機械的・電気的技術では、正極活物質とAI箔 を混ぜて粉末にした後に、化学的な精製で有用元素を回収するしかないため、材料の分離が難しい。

図3 従来の電気パルス法



数十億分の1秒~0.1秒の短い時間で、数ギガワット~数百ギガワットの大きなパワーを物体に与えることで絶縁破壊、プラズマ化、通電などを生じさせ、そこで起こる衝撃波、高温化、相変化、爆発などで分離を促す。目的に応じて精緻に制御することで、複数の物質の物理分離を高効率・低エネルギーで行うことができる。

サイクルでシミュレーションしたり、 評価したりできる専門家との協働は 譲れませんでした」と所さんは体制 構築に向けたこだわりを明かす。

試行錯誤で精緻な制御を実現 メカニズム解明は苦難の連続

資源循環のための技術開発で所さんが重視したのは「環境」「経済」「社会」という3つの視点だ。環境負荷が抑えられ、経済性が高く、時代ごとの社会からの求めにも応える技術こそが、これからの循環型社会の構築に欠かせない。「環境・経済・社会の調和を達成した分離技術があれば、現状では廃棄しているものから高機能の素材を取り出すことも可能です」と所さんは強調する。

では、所さんは、新規電気パルス法 にどのように行き着いたのか。当初 から念頭に置いていたのは社会課題

て分離を実現する電気パルスに思い至ったという。高電圧だが瞬間的な通電のため、エネルギー利用は比較的少ない(図3)。

しかし、従来の電気パルス法では 発生させる衝撃波を主に使用するため、分離精度が低かった。LIBの例で 言えば、AI箔と正極材活物質の界面 で、両者を完全に分離することは困 難であった。もっと精緻な分離を実 現するには、放電経路、電流・電圧波 形、電圧を加える印加頻度なども、従 来の方法以上に細かく制御する必要 がある。言い換えると、衝撃に頼らず 他の現象も生かせれば、選択性の高 い界面での分離も実現可能だ。

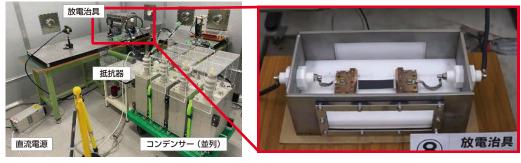
適用条件として、分離の対象はAI 箔と正極材活物質のように電気を通すもので、しかも電気的な特性が異なっている必要がある。一方で、従来の方法と違って、水中だけでなく気中でも実施可能というメリットも

あった。試行錯誤を経て、新規電気パルス法の可能性は実験室レベルで確認された(図4、5)。「運転条件を精緻に制御すれば界面での分離が生じることは、理論上はわかっていました。早い段階でその現象に出合えて幸運でした」と所さんは振り返る。

ただ、そこからは苦難の連続だった。まず、目の前で起きた正極材活物質が剥離する現象を科学的にどう説明するか、という関門が立ちはだかった。そこで本格研究では、メカニズムの解明に欠かせない分析機器を調達し、剥離現象を高速度カメラで撮影するなどの作業を進めた。現時点では、通電で生じるジュール熱によって界面上の接着剤が分解され、電磁場のローレンツカによってAI箔が膨張し、剥離が促されることが明らかになった。

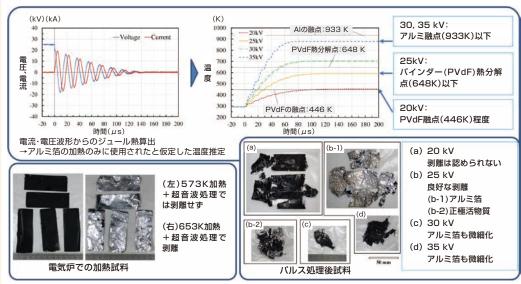
このままメカニズムの解明が順調

図4 新規電気パルス法の材料分離実験装置



装置奥の放電治具に電流を流し、その際に生じる衝撃波や爆発を制御することで、精密な材料分離を行う。

図5 新規電気パルス法による材料分離



新規電気パルス法は、放電経路を精緻に制御することにより、高選択的・高効率に部品・素材の分離を実現した。

に進むかと思われたが、その後、多種多様なLIBに対しては、剥離現象が安定しないという壁にぶつかった。「どのようなLIBでも剥離現象を再現できるように、まず仮説を立てて実験を重ね、その結果を定量的に分析することで、メカニズムの解明につなげていきたいと考えています」と所さんは今後を見据える。

変わる企業側の問題意識装置をスケールアップへ

もう1つの難題は、マルチマテリアル化への対応だ。具体的には、分解しやすいEVの車体への適用可能性の検討である。EVの車体は軽量化を突き詰めるため、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)などさまざまな素材を適材適所で組み合わせる。それらの異種素材を互いに分離したり、CFRPから炭素繊維だけを分離したりする技術として、新規電気パルス法の可能性を探るというものだ。

特に苦労したのは、実験材料の提供における企業との交渉だったという。どのような物質がどのような科学的な形態で存在するのか、その情報があれば、素材の検討がしやすくなる。しかし、企業と守秘義務契約を

交わしていても、機密保持の観点から製品情報の開示を断られることも あった。「このような状況では、分離 技術は育ちません」と所さんは懸念 を語る。

とはいえ、所さんが自ら指摘するように、資源循環に対する企業側の問題意識は大きく変わってきている。「今こそ、インバース・マニュファクチャリングやサーキュラーエコノミーを達成するための取り組みを始めるラストチャンスです」と今後に望みをかける。本格研究から約3年半。新規電気パルス法は、メカニズム

の解明にはまだ 課題を残しつつ も、一定の成果 を上げている。

すでにかないでしい解をにまでがいいののいき技でらいすと、はいまないすと、になっていませんがあるる術き、「設うのないないないない。これは、は離かまとて分計観技

術の適用を想定す るなら、こうした設 計が求められる、と 定性的に提案する ことも可能ですしと 所さんは新技術の 現在地を語る。事業 最終年度では、社会 実装に向け、企業と 共に実験装置のス ケールアップに挑 む。LIBの材料分離 をする実験装置に は、LIBの搬送部や 正極材活物質の回 収スペースも組み 込み、本格的な分離 装置に近づけた。

研究開発で所さんが重要視しているのは、研究シーズから出発するのではなく、社会ニーズを理解することだ。「サプライチェーン全体を見渡した上で、分離技術やプロセスとしてのボトルネックはどの部分にあるのか、正確に理解してから研究開発に取り組むことが大事です。初期段階の課題設定を間違わないように注意したいですね」。新規電気パルス法とさまざまな分離技術を組み合わせながら、循環型社会の構築に向けた所さんの取り組みは続いていく。

(TEXT:茂木俊輔、PHOTO:石原秀樹)





社会実装につながる研究 開発現場を紹介する「イノ べ見て歩き」。第2回は、独 自の画像照合技術を用い、 2016年の熊本地震で崩落 した熊本城の石垣修復を支 援した熊本大学大学院先端 科学研究部の上瀧剛教授を 訪ねた。

- 夕による独自の画像照合技術で

Koutaki Gou

熊本大学 大学院先端科学研究部 教授 2017年~21年 A-STEP 研究責任者

「森と水の都」に甚大な被害 元に戻すには10年以上かかる

東に阿蘇外輪山、西に有明海を望 み、中心部には阿蘇山の根子岳を源 流とする白川が流れる「森と水の都し 熊本県熊本市。自然の恩恵を受けて 発展を遂げてきた同市を、2016年4 月14日にマグニチュード(M)6.5· 震度6弱、16日にM7.3·震度6強の 巨大地震が襲った。後に「平成28年 (2016年)熊本地震 | と命名された 震災は、住宅の倒壊や土砂崩れ、避難 生活のストレスによる震災関連死な どの甚大な被害をもたらした。

とりわけ熊本市民に衝撃を与えた のが、熊本城の崩壊だ。加藤清正が 1607年に築城して以来、長年親し まれてきた天守閣は屋根瓦と鯱が壊 れ、城を取り囲む石垣の約3割におよ ぶ数万個もの石材が崩落した(図1)。 震災後、ただちに熊本城復旧基本計 画が策定され、市を挙げて動き出し た。しかし、石垣の修復には大きな困 難が伴った。重要文化財保全の観点 から、全ての石材を寸分違わず元に 戻す必要があったからだ。同じような 形・大きさ・色の石材を目視で判別し 修復するには、熟練の石工職人の手 でも10年以上かかるとされていた。

そこで立ち上がったのが、熊本大 学大学院先端科学研究部の上瀧剛教 授だ。震災直後の16年5月に、熊本 大学内で復興支援プロジェクトが発 足した際に、教員同士で知見を持ち 寄った。上瀧さんは当時、見本画像と 撮影した画像を比較し、同一のもの であるかを高速かつ正確に照合する 画像処理技術の研究をしていた。「ベ ルトコンベアー上の部品を特定する ために使っていましたが、この技術 を石垣にも応用できるのではないか と考え、石垣照合システムの開発を 始めました」。

前後の写真を比較し位置特定 立ちはだかった「武者返し」

早速、震災前と震災後の石垣の写 真を比較し、崩落した石材1つ1つの 元の位置を特定しようとした。しか し、画像データに問題があった。震災 前の写真は補修工事の記録用として

撮影された解像度の低い 2次元(2D)データだっ たのだ。「そのため、新た に撮影した高精度3次元 (3D)データとは画質レ ベルが大きく異なり、う まく照合できませんでし た」と上瀧さんは当時を 振り返る。

そこで熊本市熊本城 調査研究センターから、 06年に補修した熊本城 北側にある「百間石垣」

の図面と、崩落後の画像の提供を受 けた。同時に、異なる位置から撮影し た3Dデータで位置関係を推定する [Iterative Closest Points (ICP) アルゴリズム「で、独自の画像照合シ ステムを構築した(図2)。そのプロト タイプで5個の崩落した石材を検証 したところ、正しい石材の位置を全 て特定することに成功した。

画像の照合で最も悩まされたの が、熊本城独特の「武者返し」だ。武者 返しとは、上に向かえば向かうほど 反り返りが急角度になっている石垣 の構造である。難攻不落とうたわれ た名城ならではの造りだが、今回の 石垣照合においても「大きな壁」と なった。「武者返しの部分は画像デー タがゆがんでしまい、正しい位置の 石材とマッチしなかったのです。作 業現場の人たちと原因を探る中で、

崩落した飯田丸五階櫓の石垣



地震により、赤枠部分の石材が落下した。

図2 ICPアルゴリズムによる画像照合



武者返しの反りを考慮していなかったことに気づきました」と上瀧さんは苦笑する。

また、散らばった石材の中には、崩落する前の写真と明らかに一致しないものがあった。検討を重ねていく中で、石垣内部にあり表面から見えない「詰石」が崩落したものだとわかった。今回の照合では、崩落前後の石材の緯度・経度の座標も活用した。「石材は重いので、ほとんどは石垣の真下に落ちます。その位置で崩落前の場所を推定しました」。照合に使えそうな方法はなんでも使ったと上瀧さんは話す。

A-STEPでシステムの精度向上 飯田丸五階櫓で9割の正答率

17年に、企業と共同研究で技術の実用化を目指すJSTのA-STEPに採択され、上瀧さんは凸版印刷と共同で石垣照合システムの精度向上に取り組んだ。同社が保有していた崩落前の石垣のデジタルデータからデータベースを作成し、崩落後の画動照合することで、石材の位置を特定する新システムを開発した。このシステムで「奇跡の一本石垣」として注目された飯田丸五階櫓の南面312個、東面159個の石材を照合した結果、約9割の正答率を達成(図3)。また、石材を新たに43個特定し、17個の

候補も見つけることができた。

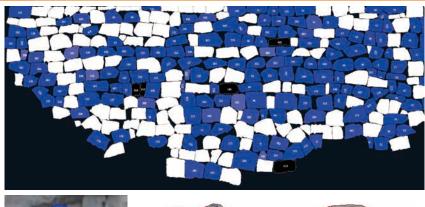
A-STEPでの成果は、熊本城の復旧工事の図面に採用された他、学術分野でも高く評価され、画像認識分野で世界的に有名な科学雑誌に掲載された。しかし、掲載までの道のりは険しかった。「1日でも早く復旧に応用できるよう既存の技術を組み合わせた成果だったため、雑誌社からは新規性がないと言われましたが、あきらめずに何度もこの成果の重要なポイントを説明しました。最終的には実際の復旧に活用されたことを評

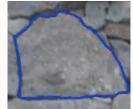
価していただけました」。

プロジェクトに携わる中で、多くの熊本市民が熊本城に誇りと愛着を持ち、復旧工事に高い関心を持っていることを肌で感じたという上瀧さん。「私自身も、なじみある熊本城の復旧に関われたことは貴重な経験になりました。熊本城の完全修復には30年かかるとも言われていますが、石垣照合システムがその一端を担えれば光栄です」。復旧作業が進む熊本城下で、上瀧さんの挑戦は続く。

(TEXT:横井まなみ、PHOTO:伊藤彰浩)

A-STEPで実証された石垣照合システム









飯田丸五階櫓の石垣崩落後写真を基に、石垣照合システムで照合した(上)。システムが候補として提示した順位が高いほど青色が濃くなっている。崩落前の石材(左下)に対し、人の目視では誤った石材(下中央)を対応付けしていたが、システムは正しい石材(右下)を提示した。

戦略的創造研究推進事業さきがけ

研究領域「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」 研究課題「蘇る太古の光合成タンパク質:量子効果の誕生」

約2.5億年前の大量絶滅 火山活動の痕跡捉える

地層記録の超高解像度分析で原因解明へ

5大大量絶滅の3回目にあたるペルム紀末大量絶滅は約2億5千万年前に起き、地球上の90パーセント以上の生物種が消滅した地球生命史史上最大の絶滅事件でした。この原因の1つに、現在のシベリアで発生した大規模火山活動が挙げられます。90万年以上続いた活動期間中のわずか6万年ほどの間に発生した大量絶滅の時間的なギャップを探るには、地層記録から接端的かる瞬間的に発生した火山活動

地層記録から壊滅的かつ瞬間的に発生した火山活動の痕跡を超高解像度で捉える必要がありました。

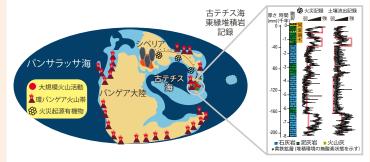
山口大学大学院創成科学研究科の齊藤諒介助教らの研究グループは、フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴質量分析計(FT-ICR-MS)を用いて、従来の100倍以上の超高解像度による地層記録の分析に成功しました。FT-ICR-MSは2014年にドイツのブレーメン大学で初めて採用された地層記録分析技術で、0.1ミリメートル間隔という超高解像度での分析が可能です。

ペルム系最上部の推積岩から検出された多環式芳香族炭化水素(PAHs)の分布を調べたところ、当時の火山活動に起因する火災が数百年規模で頻発して

いることがわかりました。さらに、火災により植生が消滅した結果、陸上土壌が海洋へと流出し、土壌中の栄養塩が海洋一次生産性の増大を招き、海洋無酸素化が発生していることも判明しました。

この研究の成果は、一連の環境悪化が数百年規模という 地質学的に非常に短い時間で発生したことを初めて明らか にしたものです。これにより、地層記録の超高解像度分析が 地球生命史事件を解明する強力なツールになり得ることが 望まれます。

本研究で分析した約2億5千万年前の火災記録と当時の古地理図



火災・土壌流出記録の黒線は0.1ミリメートル間隔で分析した今回の結果、赤線は従来の分析手法による結果を示す。従来の100倍以上解像度が上昇していることに注意。ベルム紀末の大量絶滅の際、数百年規模で火災と土壌の海洋流出が繰り返し発生し、同時期に海洋が無酸素化したことがわかった。

研究成果

研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)産学共同(育成型)研究課題「動物用がん診断・治療を可能にする機能性光細菌」

細菌が「阿吽の呼吸」でがん細胞を倒す

腫瘍内から免疫を活性化させる細菌の単離に成功

低酸素状態の腫瘍内部で選択的に集積・生育・増殖が可能な細菌を利用したがん治療が注目されています。従来のがん細菌療法は、薬を体内の特定の部位に送り届ける技術であるドラッグデリバリーシステムの概念を出ず、効果も十分とは言えないものでした。また、腫瘍組織内では腫瘍の種類ごとに独自の細菌叢が保有され、これらが抗がん剤の補助や阻害

の要因となることが明らかになっていますが、腫瘍内から取り出した細菌そのものをがん治療へ用いる研究は行われていませんでした。

この課題に対し、北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科の都英次郎准教授らの研究グループは、マウス体内の大腸がん由来腫瘍組織から主に3種類の細菌を単離・同定し、これらを寺社に置かれた仏像や狛犬になぞらえ、2つをA-gyo(阿形)、UN-gyo(吽形)、そしてA-gyoとUN-gyoから成る複合細菌をAUN(阿吽)と命名しました。

これらの細菌を、大腸がんを皮下移植したマウスに投与した結果、低酸素状態の腫瘍環境内で高

い抗腫瘍効果が確認されました。特にAUNは、A-gyoとUN-gyoの協奏作用によって、1回の投与でも細胞障害性の免疫細胞を効果的に活性化させ、大腸がん以外のさまざまながんに対しても強力な抗腫瘍活性を示しました。また、マウスを用いた生体適合性試験では、AUNそのものが生体に与える影響は極めて少ないことも確認されています。

この成果によって、腫瘍内から発見した細菌を用いたがんの診断・治療法の構築、加えて細菌学や腫瘍微生物学などにおける新しい概念の創出への貢献が期待されます。



A-gyoとUN-gyoから成る 複合細菌のAUNが、まさに 「阿吽の呼吸」によってが ん細胞を倒すイメージ図。

研究領域「光の特性を活用した生命機能の時空間制御技術の開発と応用」 研究課題「ホログラム光刺激による神経回路再編の人為的創出」

失明すると触覚が鋭敏になる仕組みを解明

感覚喪失時に起こる脳の代償メカニズムを追究

私たちは目や手、耳といった感覚情報を用いて状況を感知します。視覚情報は視覚野、触覚情報は体性感覚野、聴覚情報は聴覚野など、それぞれの脳の「専門部位」で主に処理されます。ところが、視覚機能を失った視覚野は、代わりに聴覚や体性感覚情報を処理するようになり、まるで視覚の喪失を代償するように聴覚や触覚が鋭敏になる「異種感覚

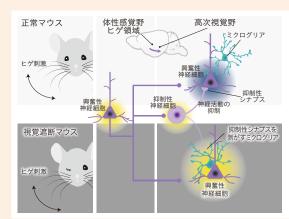
間可塑性」という現象を生じることが知られています。しかし、その詳細なメカニズムはわかっていませんでした。

名古屋大学大学院医学系研究科の和氣弘明教授らの研究グループは、脳内のグリア細胞の1つであるミクログリアに着目。マウスを対象に、2光子生体イメージングや電子顕微鏡、電気生理学的手法、分子生物・遺伝学的手法などのさまざまなアプローチ方法を用いて、このメカニズムの一端を解明しました。

マウスは、生まれて間もない時期に視覚機能を失うと、高次視覚野の神経細胞がヒゲの触覚刺激に応答するようになり、それに伴いヒゲの触覚機能も向

上することがわかりました。この現象は、高次視覚野のミクログリアが細胞外基質を溶かす酵素を産生し、抑制性シナプスを剥がしとり、体性感覚野から高次視覚野への伝達経路の抑制システムを解除することによって引き起こされることが明らかになりました。

今回の研究で高次視覚野における視覚喪失時の脳の代償システムとミクログリアによる制御が解明されました。これにより脳の多種感覚情報統合・分別に関わる新たなメカニズムの提唱にもつながる可能性が見いだされました。



研究成果

戦略的創造研究推進事業CREST

研究課題「細胞外微粒子への生体応答と発がん・動脈硬化症との関連の解析」

戦略的創造研究推進事業さきがけ

研究課題「マクロファージによる粒子状物質パターン認識機構の解明」

CNTを認識する免疫受容体を発見

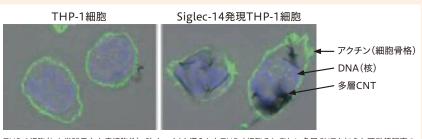
世界初、ヒトの安全性確保の一助に

カーボンナノチューブ(CNT)は、幅広い分野での利用が期待されている日本発次世代ナノ材料ですが、一部の多層CNTは動物実験でアスベストに似た炎症毒性が報告されています。これは免疫細胞のマクロファージが多層CNTを貪食した際に、強いストレス応答によって慢性炎症を引き起こすことが原因だと考えられています。しかし、毒性の発現機構やヒトでも同様の毒性を示すかは不明でした。

立命館大学薬学部の中山勝文教授、名古屋大学大学院医

学系研究科の豊國伸哉教授らの研究グループは、マウス実験で多層CNTによる 炎症に免疫受容体「Tim4」が関与していることを明らかにしました。次に、ヒト細胞を用いた実験において、Tim4以外の受容体が多層CNTの炎症に関与していることを見いだしました。Tim4以外のヒト免疫受容体を見つけるために、コンピューター上の仮想実験であるインシリコ探索 を行ったところ、約15万種のたんぱく質3次元構造の中から「Siglec-14」を発見しました。また、ヒトのマクロファージにおいてSiglec-14が多層CNTを認識すると「脾臓チロシンキナーゼ」というリン酸化酵素の活性化を介して炎症性サイトカインが分泌され、多層CNTの貪食作用を誘導することを突き止めました。

この研究はヒトがCNTに協立された場合の炎症毒性発現メカニズムを明らかにしたものであり、治療・予防法の開発に貢献します。CNTがヒトに有害かは不明であり、今後CNTを扱う労働環境などで曝露量を予想し、リスクを判断する際に今回の成果が役立つことが見込まれます。



THP-1細胞(ヒト単球系白血病細胞株)、Siglec-14を導入したTHP-1細胞それぞれに多層CNTを加えた顕微鏡観察の図。多層CNTを細胞内に取り込んでいる様子が顕著に確認できる(右)。



笠原 和美 Kasahara Kazumi

産業技術総合研究所 情報·人間工学領域 研究員

Profile

静岡県出身。2013年首都大学東京(現・東京都立大学)博士 後期課程修了。博士(放射線科学)。国立精神・神経医療研究センター、沖縄科学技術大学院大学などを経て、20年より現職。21年より創発研究者。



筑波山の展望台にて。忙しい研究活動の中、子どもたちと遊ぶひとときが良い息抜きとなっています。

Q1. 研究者を志したきっかけは?

A1. 子どもの頃に観たテレビに影響 脳の複雑な働きに興味を持つ

9歳の時に「脳と心」を特集したテレビ 番組で、医学博士の養老孟司さんが最先端 の3D映像を使ってDNAやシナプスの解 説をされていました。その映像がとても美 しく、実際に頭や体の中のミクロの世界を 見てみたいと思ったことがきっかけです。

その思いはずっと続き、大学の放射線技術学科に進んでMRIや画像診断技術を学び、頭部に損傷を受けた患者の脳の画像の解析などを行いました。その中で、脳の損傷がどのように治っていくのか、いかにして他の部位が代替していくのかなど、脳の働きに興味を持つようになり、脳神経科学の分野に移りました。その過程でBMI(Brain-Machine Interface)に注目し、「BMIを活用したリハビリテーション」の研究を始めました。

Q2. 研究のテーマとやりがいは?

A2. 脳と機械をつなぎ活動を援助 誰もが簡単に使える新しい道具へ

BMIとは、患者の脳活動に基づいて機械を操作することで、病気やけがにより失われた脳機能を代替する新しい神経工学技術です。脳機能を代替するだけではなく、脳卒中患者の脳活動を解読し、患者の手肢をロボットアームで動かすことで、リハビリテーション効果を高めることも報告されています。

しかし、BMIの操作、つまり体を動か すようにイメージし、脳の活動を自在に 変えることには得手不得手があります。 創発の研究では、この差を調べるために脳の中枢部の「大脳基底核」の一部である「被殻」の活動に注目しています。研究を進める中で、操作が得意な人の被殻はBMI中に「運動野」につながっている一方で、操作が苦手な人の被殻は運動野だけではなく、認知や情動に関わる広範な大脳領域とつながっていることがわかりました。この現象はBMIを操作する際「脳の使い方」に個人差があることを示しています。これらの差が具体的に何を意味するかはまだわかっていませんが、この研究では理論的な思考をする人は不得手で、物事を直感的に捉える人は得手という傾向を捉えました。

BMIの研究では脳に「個人差」があることが大前提です。被験者の生活習慣や経験が異なることから、得られた結果をどのように解釈するかを検討することが難しいところであり、面白いところでもあります。今後は、BMIの操作が得

意な人が持つ特性を明らかにするとともに、血液型のように脳の特徴を分類して、1人1人の特徴に合った「テーラーメイド・ニューロリハビリテーション」を提案できるようにしたいです。そして将来的には、家庭や高齢者施設などで誰もが簡単に使えるようなものになればと考えています。

Q3. これから研究者を目指す人に一言 A3. 絶えず情報をアップデートし 好奇心を持ってチャレンジを

現代は多種多様な情報や新しい学説が次々に発信されています。それらを吸収し、絶えずアップデートしておくことが今の研究者には必要です。一方、それらの情報に惑わされずに自分の研究を進める根気強さも欠かせません。バランスを保つためには幅広い視野と知見を持つことが大切だと思います。

幸い私が研究員として在籍した沖縄 科学技術大学院大学は、50以上の国 から研究者が集まり、科学分野の垣 根を越えて協力し合う学風だった ため、多様な考え方とたくさんの 知識を得ることができました。皆 さんも好奇心とチャレンジ精神 を持って、新たな道を拓いてくだ さい。





脳波を使ったBMIの操作成績と MRI(磁気共鳴機能画像法)で計 測した脳活動や脳構造を比較す ることで、操作成績に影響する脳 の特徴を明らかにします。

「周当の個性」に合わせたりハビり 神経工学の技術原体し提案的ざる





July 2023

発行日/令和5年7月3日

編集発行/国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)総務部広報課 〒102-8666 東京都干代田区四番町5-3サイエンスプラザ 雷話/03-5214-8404 FAX/03-5214-8432

E-mail/jstnews@jst.go.jp JSTnews/https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/

