

JST news

未来をひらく科学技術

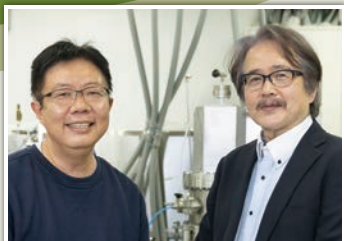
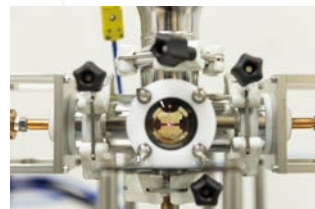
6 | 2023
June



末永く暮らせる地域づくり目指し
エネルギー・物質を効率的に循環

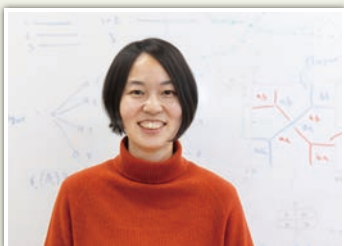


全ての人が幸福感を得られる公平な社会
理想の分配を数学的アプローチで追求



03 特集1

末永く暮らせる地域づくり目指し
エネルギー・物質を効率的に循環



08 特集2

全ての人が幸福感を得られる公平な社会
理想の分配を数学的アプローチで追求

12 〈新連載〉イノベ見て歩き

廃プラスチックを高度に選別する装置 大学発ベンチャーで製品化を目指す

14 NEWS & TOPICS

≫ ロボットは褒めの伝播と循環を生み出す
≫ 「期待外れ」を乗り越えるドーパミン細胞

ほか

16 さきがける科学人

光合成をやめた
菌従属栄養植物の謎に迫る

神戸大学 大学院理学研究科
生物学専攻 教授(卓越教授)

末次 健司

第3回世界防災フォーラム参加報告

「災害で悲しむ人をこれ以上増やしたくない」との願いを込め、東日本大震災を経験した東北の地で2017年に始まった世界防災フォーラム(World BOSAI Forum: WBF)。第3回となるWBF2023が3月10~12日の3日間、宮城県仙台市で開催され、国内外で防災・減災に取り組む多様な参加者が議論を交わしました。JSTからも国際部、社会技術研究開発センター(RISTEX)、「科学と社会」推進部(4月にRISTEXへ統合)が出展し、その様子をJSTウェブページで紹介しています。ぜひご覧ください。

URL: <https://www.jst.go.jp/report/2023/230517.html>



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

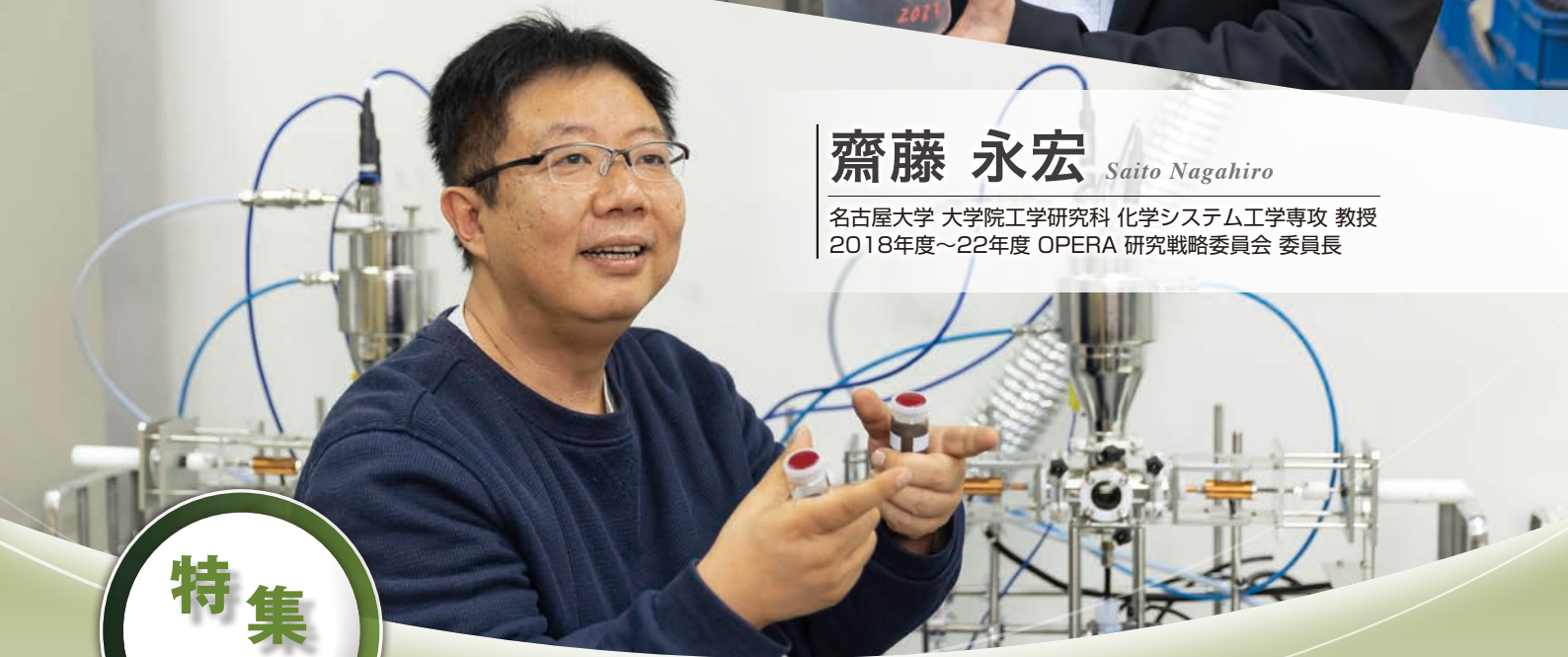
北 英紀 *Kita Hideki*

名古屋大学 大学院工学研究科 化学システム工学専攻 教授
2018年度～22年度 OPERA 領域統括



齋藤 永宏 *Saito Nagahiro*

名古屋大学 大学院工学研究科 化学システム工学専攻 教授
2018年度～22年度 OPERA 研究戦略委員会 委員長



特集

OVERVIEW

末永く暮らせる地域づくり目指し エネルギー・物質を効率的に循環

エネルギーや物質を効率よく循環させる技術は、豊かで安全・安心な地域社会を構築するためには不可欠なものとなりつつある。OPERA「物質・エネルギーリノベーション共創コンソーシアム」では、東海・北陸地域の物質とエネルギーの有効活用技術の開発や社会実装を通して、人々が住み慣れた地域で末永く暮らしていけることを目指している。プロジェクトを率いてきた名古屋大学大学院工学研究科の北英紀教授と齋藤永宏教授に、コンソーシアムの狙いや成果、今後の展望などについて聞いた。

中部地域で安全・安心な生活 2つの資源サイクルで実現

高齢化社会における地域づくりを考える上で、キーワードの1つに「Aging in Place(AIP)」という言葉がある。年を重ねても住み慣れた地域で、自分らしく安全に生活していくという価値観を表したものだ。これまでと同じ場所で、ずっと安全・安心に暮らすことができ、その恵みを次世代に継承していけることは、高齢者に限らず、誰にとっても望ましい生活であり、1つの幸せの形と言える

だろう。

このAIPをテーマに研究開発を進めるのは名古屋大学大学院工学研究科の北英紀教授だ。領域統括として、OPERA「物質・エネルギーリノベーション共創コンソーシアム」を率いている(図1)。コンソーシアムには名古屋大学、信州大学、大阪公立大学、芝浦工業大学、東京理科大学の5大学と会員企業16社が参画し、併設するアドバイザー委員会の助言も受けながら、エネルギーエコシステムにおける物質・エネルギーの高度な循環の確立を目指して研究開発を進め

ている(図2)。

一見すると、研究テーマがAIPとかけ離れているようにも思えるが、北さんとともにコンソーシアムを牽引する同研究科の齋藤永宏教授はテーマに込めた思いをこう語る。「昔から自分の居場所はどこだろうという思いがあり、AIPは私自身のテーマでもありました。OPERAでは大きな未来を描く研究ができると知り、自分たちの研究を通じて、AIPに貢献できることを突き詰めて考え、提案しました」。

一口に安全・安心な暮らしと言っても、目指す像はさまざまだろう。そこで北さんたちは、始めにOPERAにおける「AIPを満たす社会」として、世界有数の工業地帯であると同時に農業や漁業、畜産も盛んという中部地域の特徴を基に、先端技術を生かして安定した雇用や高い教育レベルを担保し、充実した地域コミュニティの上に伝統、文化、スポーツなどが振興する豊かな社会を設定した。

次に、安全・安心で豊かな暮らしのベースには、産業や人々の生活基盤を支えるエネルギーが安定的に供給され、経済活動で排出された大量の廃棄物を適切に処理できる持続可能な地域であることも、重要な要素として含まれると考えた。ここなら、自分たちの研究が生かせると確信し、地域社会に活力と安心をもたらす「地域資源活用型エネルギーエコシステム」の構築を目標に掲げた。この構想の下で「高度循環システムの構築」と「エネルギーの地産地消と安定供給」という2つの資源サイクルを組み合わせ、大学のシーズを存分に活用した研究活動を進めている。

「工場の排熱や農業廃棄物、有害物などはそのままでは無価値です。しかし、排熱や廃棄物を資源として高い価値を持つ有価物にリノベーションできる技術の開発がエコシステム構築のカギになります」と北さんは狙いを語る。地域に豊富にある物質やエネルギーを最小限のロスで変

図1 コンソーシアムの概要

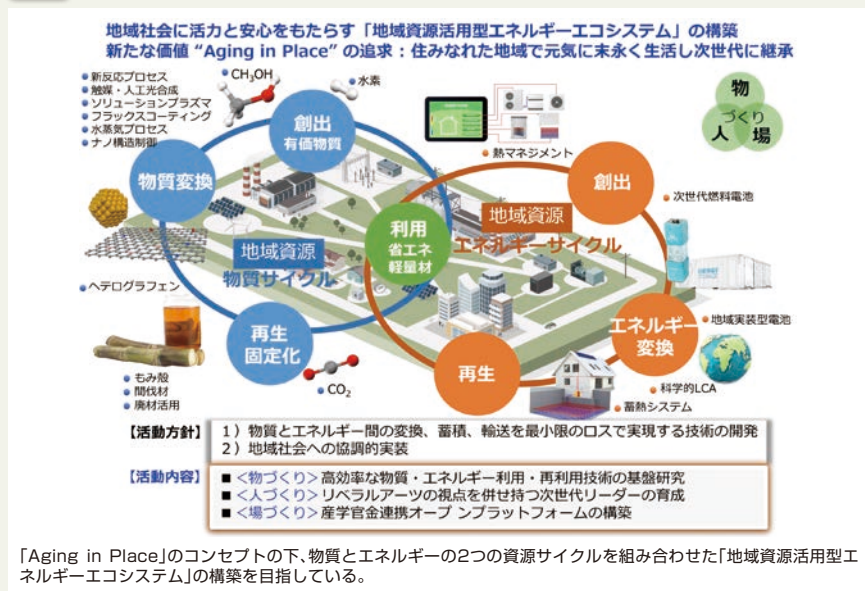


図2 コンソーシアムの運営体制図

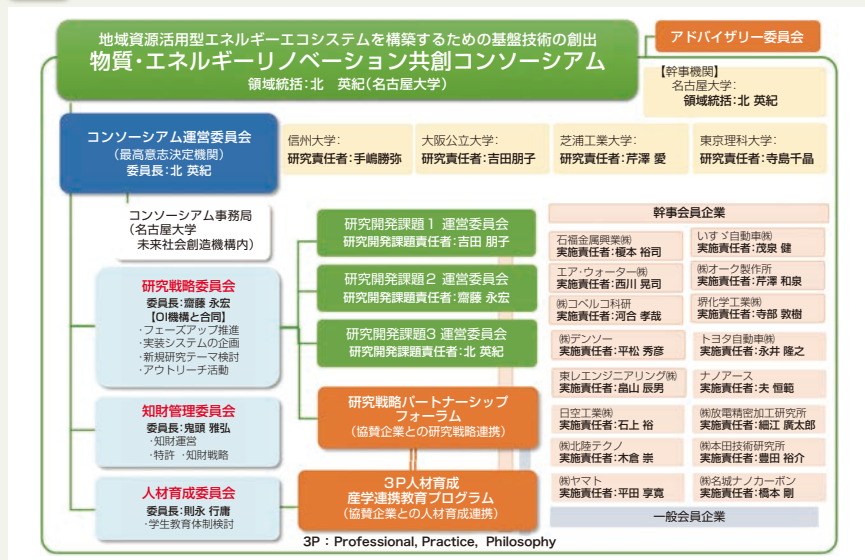
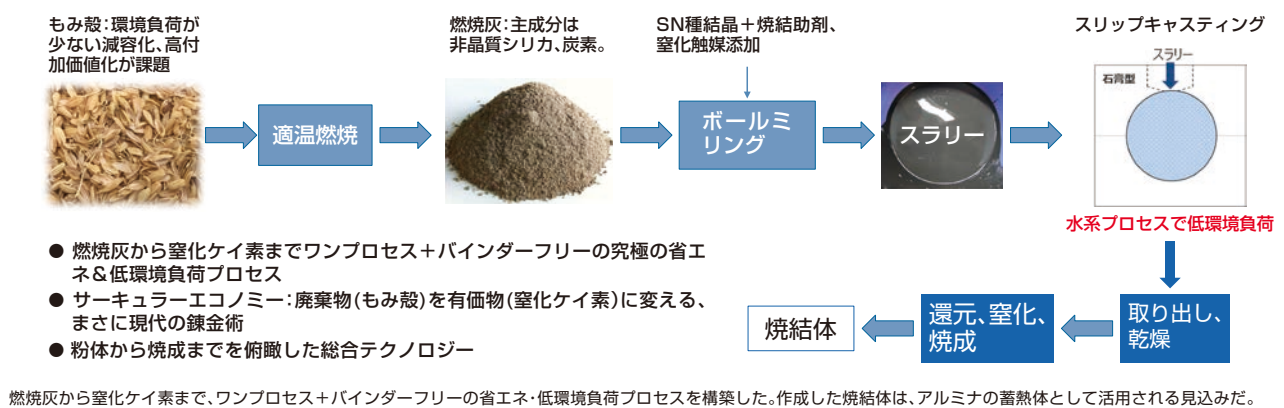


図3 もみ殻を原料とするセラミックス部材の製造プロセス



換、蓄積、輸送し、それを地域社会に根付く産業の中でうまく再利用できれば、目指している豊かな社会に近づく確かな1歩となることは間違いないだろう。

3000トンのもみ殻を燃やし新蓄熱体の開発に取り組む

コンソーシアムが研究開発課題に設定するのは①安価で高性能な触媒の開発②安価で高効率なエネルギーデバイスの開発③高効率熱マネジメントシステム並びにその設計・評価技術の開発だ。5年に及ぶ研究の成果として、もみ殻の完全循環構想が挙げられる。稲作の盛んな富山県射水市では、もみ殻の野焼き処理を禁止されて以来、毎年約3000トンも廃棄しなければならず大きな負担となっていた。

バイオマス産業都市構想を掲げる同市は、もみ殻を高付加価値の物質に変換したいと、北陸テクノ(射水市)や大学との共同研究を通じて、非晶質シリカが生成できる条件を明らかにし、そのための炉を開発した。灰の主成分である非晶質シリカは水に可溶であるため、土中に浸透しやすいことからまず肥料として利用技術が進んだ。OPERAではさらに、付加価値の高い物質であるケイ素(Si)及びその炭化物、窒化物などの高機能材原料に転換するための技術開発を進めている(図3)。最終的に目指すのはもみ殻の完全循環システムであり、燃え残った灰だけではなく燃焼時の排熱や二酸化炭素(CO₂)も有効活用し、廃熱は蓄熱体に貯めて温水プールや病院などの熱を利用する場所に運び、熱を取り出すという構想である。

熱の効率的な活用でカギとなった

のは、新たな蓄熱体の開発だ。上記のような遠隔地への熱輸送には化学反応を利用した蓄熱が有望であり、OPERAでは水と接触させることで高い出力を生じる反応系を見いだした。

また工業炉の熱効率向上にも高温蓄熱体は必須である。一般的にはファインセラミックスの一種であるアルミナが用いられている。数十秒で吸熱・蓄熱の切り替えはできるが、短時間の加熱で温まるのは球体の表面だけで、内部はほとんど熱回収に寄与していないことがわかった。そこで北さんは、通常は白色のアルミナの球を黒く、かつ中空にすることで放射効果を利用し内外面から熱吸収させることで回収率を向上させた(図4)。

さらに、蓄熱量を大きくするため、物質の相が変わるときに発生する潜熱も利用する蓄熱体の開発に取り組

図4 アルミナ中空構造体

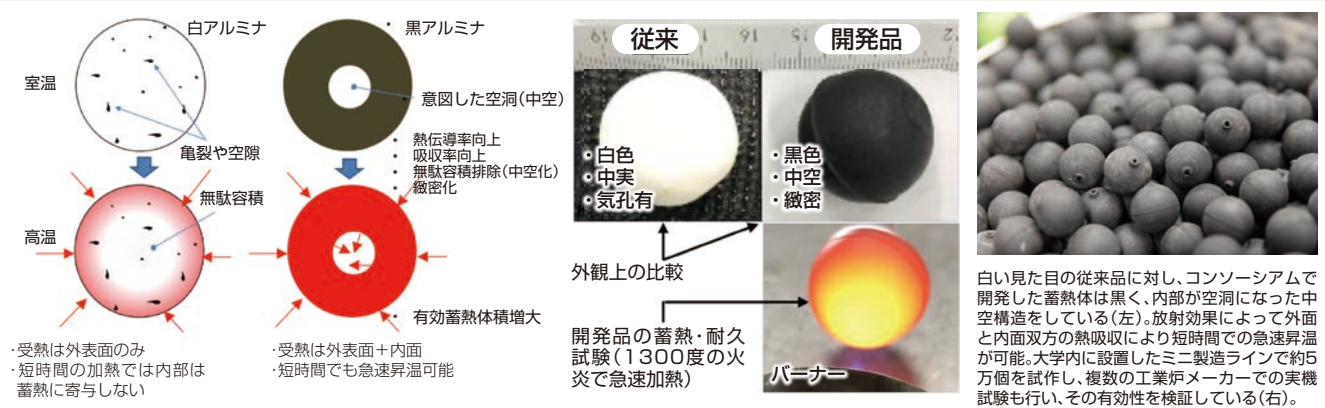


図5 ヘテロカーボン複合解析用データベース



んだ。当初、中空のアルミナ内部に熱伝導率の高い銅を入れたコアシェル型の蓄熱体を作ったところ、大気中で溶融すると銅がアルミナと激しく反応して漏れ出し、注入口が封止できなかった。そこで、ビーズ状の銅と、銅とアルミニウム合金の粉末を^{じゅうてん}充填したところ、注入口周辺で大気に触れることで原料の一部が、アルミナシェルと反応して自己シール機能が発現した。「時間が進むほどシール機能が強化されることもわかり、1100度で1000時間の耐久試験もクリアしました。現在、実用化に向けて企業とさらなる検討を進めています」と、北さんは笑顔を見せる。

しかし、こうした部分的な改善に加えて、循環システム全体を俯瞰し、全体の効率を改善することも必要である。そこで、北さんたちは大規模循環システム全体を評価・設計するグラフツールの開発にも乗り出した。循環システムではさまざまなエネルギーや物質が形態、構造を変えながらその資源性が消費されていく。このエネルギーと物質の共通の資源性を一元的に示すのがエクセルギーであり、循環の際のエクセルギーの消費量を簡便に計算でき、また消費の大きいプロセスが可視化され、システム全体の省エネ化を実現するとい

う。「循環システムといった大規模なシステムを対象として設計する例は極めて少なく、企業の理解も進んでいません。しかし、社会の持続発展に向けては、個々の研究の進展だけではなく、それらが統合されてどうなるかという総合知をいかに得るかが重要です」と北さんは決意を口にする。

ヘテロカーボンのDBを構築 プラズマ材料合成も手掛ける

一方、齋藤さんが主に手掛けるのは、グラフェンをはじめとしたナノカーボン材料だ。カーボンはリチウムイオン電池や燃料電池など、多岐にわたるエネルギーデバイスへの活用が期待されている半面、炭素原子

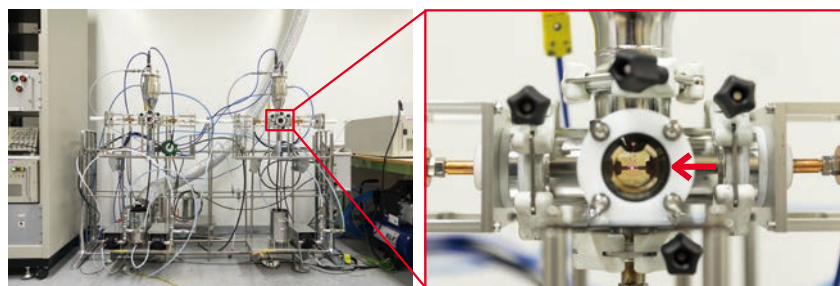
の一部がホウ素原子や窒素原子に置き換わった組成や構造が多様で正確な構造分析が難しいといった問題があった。そのため、これまでは研究者の勘と経験に基づいて、材料開発やデバイスの改良が行われてきた。

そこで、齋藤さんはヘテロカーボンを正しく理解するための「ヘテロカーボン複合解析用データベース」の開発を手掛けてきた(図5)。新たな構造解析技術を開発するところからはじまり、AIなどを用いた解析やマテリアルズ・インフォマティクス(MI)にも活用しやすい分析・物性データを揃えていった。DB作成にあたっては、大学からはサーバー構築やライセンス処理の支援を、中部地域の企業からはサンプル提供を受けた他、参画企業各社の計測技術や材料化学技術なども集結させた。

現在、カーボン約300種、データ数4万件以上と、カーボン材料としては圧倒的な優位性を誇る。「データ数を増やすことではなく、実際に自分たちが実験したデータだけを入れることにこだわりました。企業の方にも正確性や信頼性が高いと評価されているのはそのためでしょう」と齋藤さんは説明する。実際にDBを用いて材料の粒径を設定し、特徴量解析を行ったところ有効性を確認することができた。今後は利用料などを支払う形でより多くの研究者が活用できる仕組みを整えていくとのことで、デバイスの性能向上への貢献が期待される。

他にも、齋藤さんはソリューション

図6 ソリューションプラズマによるグラフェンの合成



齋藤さんの研究室では、専用の装置を用いたカーボン材料の開発が進められている。写真は、ベンゼンからグラフェンを生成している様子。拡大図中央のオレンジの光がプラズマで、気泡は水素。発生した水素ラジカルが還元剤として働き、グラフェンが生成する。

ンプラズマ材料合成を長年手掛けて
いる(図6)。芳香族系のベンゼンやトル
エンなどの溶媒でソリューション
プラズマを発生させることで、カー
ボン材料を合成する手法だ。グラ
フェンをはじめとしたカーボン触媒
は、燃料電池用に用いられる白金触
媒の代替として注目されている。現
在までの研究でこれまでの触媒に比
べて白金の使用量は10分の1に削減
され、耐久性も10倍に上がっており
社会実装が期待されている。

大学内外に推進室や新法人設立 産学連携でシーズを社会に橋渡し

企業との共同研究では、機密情報
や知的財産の取り扱いなど、多くの
現実的な問題が伴う。トラブルを避
けるために、事前に厳密な取り決め
をするケースも多い。「今回、私たち
は事前の契約を最小限にし、問題が
出てきたときに都度話し合うという
スタイルをとりました。これはAIPと
いうコンセプトに共感した企業のみ
に参画いただいたからこそできたこ
とです」と齋藤さんは説明する。目先
の成果ではなく、AIPという大きなビ
ジョンを目指した研究だという共通
認識があることで、落としどころも
見つけやすくなる。これが功を奏し、
紹介してきたような多様な成果に結
実している。

「OPERA開始時に大学内にでき
たオープンイノベーション推進室と
の連携ができたことも大きな成果で
す。組織として産学連携を進められ
る体制が整いました。培ったノウハ
ウを他のプロジェクトにも生かし
たいですね」と北さんは語る。また、
2023年10月にはコンソーシアム
の成果を活用する新法人も設立予定
だ。クロスアポイントメント制度を
利用して齋藤さんも新法人に籍を置
くという。「大学外の法人とすること
で、より柔軟な資金運用も可能にな
ります。オープンイノベーションの
ロールモデルにしたいですね」と齋

図7 3P人材育成産学連携教育プログラム



「Professional」、「Philosophy」、「Practice」の3つの「P」から成るユニークな人材育成プログラムを実施し、研究開発と並行して研究者や学生の人材育成に注力している。

藤さんも意気込む。

こうした新しい取り組みは、次世
代人材育成の取り組みにも波及して
いる。目指すのは、実社会で自律的に
活躍できる「^{プロフェッショナル}Professional」、自ら豊
かさとは何か、幸せとは何かを考え、
そのために自分は何ができるかを考
えられる「^{フィロソフィー}Philosophy」、行政・地域
と連携して実社会の課題の認識・解
決に向える「^{プラクティス}Practice」の3要素を兼
ね備えた「3P人
材」だ(図7)。コ
ンソーシアムで
は3P人材育成産
学連携教育プロ
グラムを設立し、
経済的支援も含
めた人材育成を
進めている。

「AIPのように
遠くに目標を置
くことで、学生も
目的意識を持っ
て研究に取り組

めますから、将来、より発展的な結果
をもたらすのではないかと思います
」と齋藤さんも期待を寄せる。コン
ソーシアムでは、研究開発はもちろ
ん、大学のシーズを社会に橋渡しす
るために産学連携の新たな仕組みを
定着させ、人材育成にも継続して取
り組むことで、地域社会をより豊か
にする活動を続けていく。

(TEXT: 桜井裕子、PHOTO: 石原秀樹)



五十嵐 歩美 *Igarashi Ayumi*

東京大学 大学院情報理工学系研究科 数理情報学専攻 准教授
2020年よりさきがけ研究代表者

世の中を見渡せば、「もの」「こと」に対して、公平な分配が求められる場面は多い。だが、誰もが納得感を得られるような公平な配分の実現は困難だ。この難題に対して、数学の力をもって取り組んでいるのが、東京大学大学院情報理工学系研究科の五十嵐歩美准教授である。数学的アプローチで「公平」という曖昧な概念をモデル化し、理想に近い分配方法を見つけ出すことで、全ての人たちが幸福感を得られる真に公平な社会の実現を目指す。

特集

OVERVIEW

全ての人が幸福感を得られる公平な社会 理想の分配を数学的アプローチで追求

曖昧な概念を「分割理論」で定義 きっかけは英国留学での交流

私たちの日常において、公平な配分が求められる場面は多い。学生への講義配分、会社でのタスク配分、家庭での家事分担など、枚挙に暇はないだろう。しかし、「何をもって公平

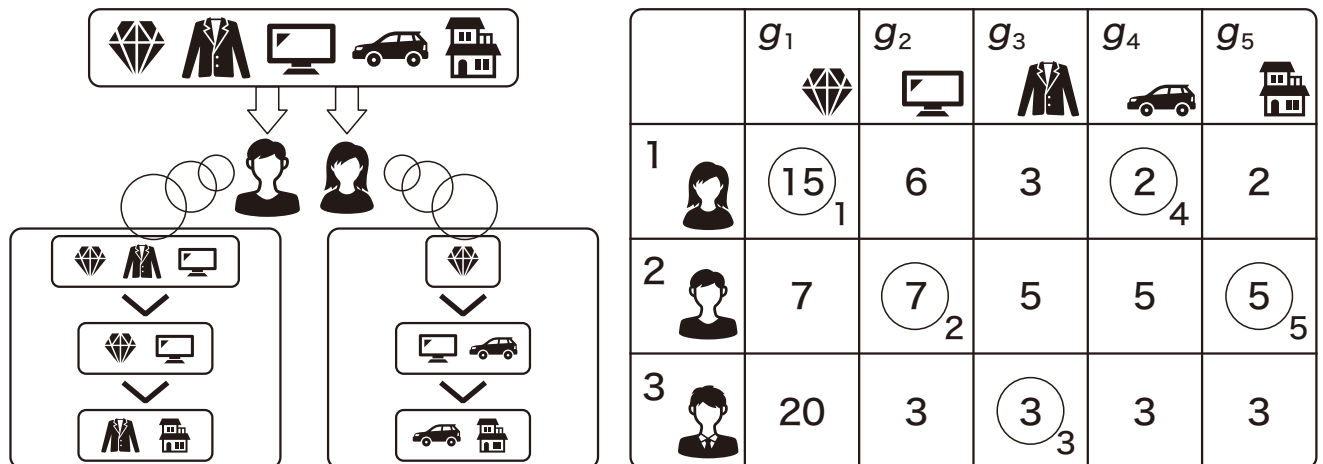
とするか」は人によって考えが異なる。妬みや不満を生じさせない、万人が満足するような配分方法を見つけ出すことは至難の業だ。

この問題を取り扱う研究が、「公平分割理論(Fair Division)」である。公平分割理論とは、さまざまな「もの」や「こと」の公平な分け方を考える理

論で、曖昧に使われがちな公平性という概念を数学的に定義し、公平性を保ちながら全ての人々を幸福にするアルゴリズムの設計を目標としている(図1)。

この研究に取り組んでいるのが、東京大学大学院情報理工学系研究科の五十嵐歩美准教授だ。「中学生の頃

図1 公平分割理論



同理論の「Round-Robinアルゴリズム」の例。個人によりアイテムの価値が異なるため、画一的な基準では不公平感(妬み)が生じる可能性がある(左)。そこで、各個人がアイテムに対し重み付けを行い、それに基づく「妬みのない配分」によって、公平性を担保する(右)。

から数学が好きでした。問題を明確に解いていくプロセスに惹かれたのです。一方で、社会や歴史にも関心があり、数学を使って何か社会に役立つことができないか、漠然と考えていました」と振り返る。

その後、五十嵐さんは筑波大学に進学。そこで出会ったゲーム理論や最適化理論に魅了されたという。ゲーム理論の研究に携わる中で、公平分割理論へと研究の軸足を置くきっかけになったのが、博士課程での英国留学だった。「留学中にチェコ、フランスの公平分割理論の研究者と共同研究をする機会がありました。同理論について基礎的な背景知識がなかったので、手探りで色々な文献を調べていたのですが、数学的に奥深くて美しく、興味深い理論が背後にあることに気づいたのです」と語る。

留学時は3人でルームシェアをしていたという五十嵐さん。借りた住宅には日当たりの良い部屋もあれば、狭い部屋もあった。各人が納得のいく部屋の割

り当てや家賃の配分にも公平分割理論が役立つなど、日常で応用できる場面が多々あり、その面白さを再認識したという。

各人の「うれしさ」を同等に役割を選んで妬みなく達成

「公平」という曖昧な概念を数学的に定義し、明確化する公平分割理論。五十嵐さんは「公平分割理論では、資源をどうやって配分するのか数学的にモデル化し、さらにゴールとしてどのような配分を目指していくのか

を数式化し、その過程においてさまざまなアプローチを適用していきます」と説明する。

最も単純な例として、複数人で複数のアイテムを公平に配分する場合を挙げよう。それぞれのアイテムに対して、各人がもらった時の「うれしさ」を示す数値を与える。さらに、それらのアイテムを組み合わせてもらったときのうれしさを、各アイテムに付与された数値を加算して導き出し、各人の受け取るアイテムの値の総和が近い数値となるよう妥協点を見つけ出していく。

図2 ケーキの分割問題

2人エージェントの妬みのないケーキ配分を計算

Q. 2人で公平に分けるには？

A. Cut and Choose Protocolを使う

2. Bさんが好きな方を選ぶ。

1. Aさんがケーキを半分に切る。

3. Aさんが残りをとる。

果物やクリームなどの飾りつけが均一でない、個々の好み異なるという条件下でどのように公平に分けられるかを数学的に検証するもの。領土の分割や業務担当時間帯の割り振りなど、さまざまな場面のモデル化に用いられている。

例えばカバンと時計に対して、それぞれをもらった時のうれしさを4と10とすると、これらをもらった場合のうれしさは4+10=14となる。このような計算を経てアイテムを受け取る人々のうれしさの総和の値を近いものにし、各人の満足度を可能な限り同等にしていけるのだ。

最も代表的な公平性の定義に「エンヴィーフリーネスenvy-freeness(妬みがない)」がある。これは、自分の持ち分をもらったうれしさが他人の持ち分をもらったうれしさを上回る状態を指す。

この状態を、AさんとBさんと1つのケーキを分け合う事例で説明しよう。まずAさんはケーキを切り、Bさんはケーキを選ぶ、という役割を与える。Aさんは自分が公平と判断した配分でケーキを切り、次にBさんが好きな方を、残ったもう一方をAさんが選択する。これにより、妬みのない配分というのが達成できる。Bさんは好きな方を選んでおり、Aさんは両方が同じ価値を持つようにケーキを切っているからだ(図2)。「このような事象に対して、さらに制約を加えたり、3人以上のケースに適用したりする研究を行っています」。

家事分担を解決するアプリ開発 「好き」「嫌い」を分析して反映

公平分割理論の研究に際して、五十嵐さんは具体的にどのようなテーマに取り組んできたのか。2019~21年度のACT-X「不可分財の公平な分け方」では、完全な公平性は保証できなくとも、可能なかぎり妬みを抑える「近似的な公平性」と、社会的な最適性がどのような状況においてバランスがとれるのか、その解明に取り組んだという。

「例えば『コーヒーと紅茶、どちらか一方で良い』といった場合、これを公平に配分するためにはどうすればいいのか、という問題について、公平な配分が上手くいくことを理論的に証明しました」。このことは、現在に至る研究の土台となっているという。

もう1つが、重み付きの公平性だ。「ワクチンの配布であれば自治体の規模に応じて配布するなど、人数などの重みを考慮したうえで、どうやって資産を公平に配分するかといったテーマに取り組みました。これも、現在の私の礎となった研究の1

つです」と語る。

さらに21年夏、五十嵐さんは、JST主催の「サイエンスインパクトラボ」に参加した。これは、若手研究者と企業・NPOなどの民間で活躍している人々との交流会を通じて、研究の社会実装を産学官民で模索するというものだ。

イベントでの話し合いにヒントを得て、家事分担の問題を解決するアプリを開発した(図3)。「公平な配分に関する題材に家事を選んだのは、多くの人にとって身近な問題でわかりやすいこと、また分担に参加する人数が少ないため、比較的数学のモデル化がしやすかったからです」と、五十嵐さんは説明する。

世の中には多くの家事アプリがあるが、タスク管理が主な機能であるのがほとんど。対して、このプロジェクトで開発された家事分担アプリの特徴は、家事に対する個々人の「好き」「嫌い」を入力、その内容を分析して分担に反映させられることにある。

具体的には、カップルやルームメイトなど、2人で共有する家事のリストを定めた後、それぞれに対してど

図3 家事分担アプリ

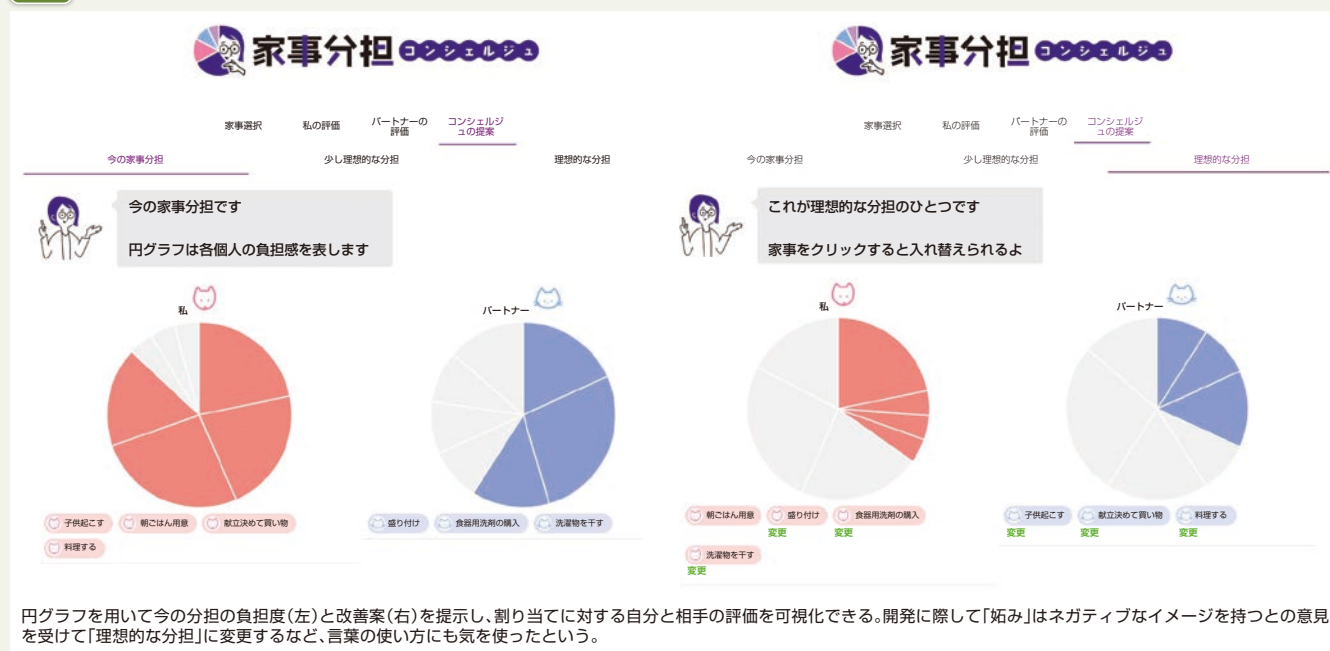


図4 複数の選択肢を選ぶ投票メカニズム



Bに投票した51人が選んだものなど、同じ意見を持つ複数の投票者の投票結果をいかに適切に反映し、公平性を実現するかといったメカニズムを考えています」と五十嵐さんは解説する。

また、「時間的な制約がある際の公平配分モデルの研究」にも取り組んでいるという。これは、セミナールームや体育館、手術室など、さまざまな施設の利用時間をいかに適切に配分するかという研究だ。

世の中に求められる「公平な配分」の実現に向け、その研究にまい進する五十嵐さんの今後の研究におけるポイントは、日常生活などの身近な視点も踏まえた理論と応用だ。「家事分担アプリの開発に取り組んだことで、より視野が広がり、理論に幅を持たせられたことは大きな一歩だと思っています。理論研究はとても楽しく、自分自身の日々の活力にもなるものですが、やはり応用は重要です。しかし、その応用にも理論的なバックボーンが不可欠です。今後は理論と応用のバランスをうまくとりながら、さらなる公平な配分の実現を追求していきたいと考えています」。

(TEXT:佐宗秀海、PHOTO:石原秀樹)

れくらい時間がかかるかといった負担度や各人の好みを選択し、個々の価値尺度を決めたうえで負担度を計算。これにより、理想的な家事配分を提案することができる。

このアプリはテレビ番組などで紹介され、分野内外から多くの反響を得られたという。五十嵐さんは「SNSなどでもさまざまな反響やご意見をいただきました。そうした声は、今後、どのような理論研究をすべきか、という道標としてとても役立っています。そして、理論だけでなく、応用も重要であることを再認識させられました」と語る。

信頼されるメカニズム構築へ 理論と応用のバランスに配慮

五十嵐さんの挑戦は現在も続いている。近年、AI技術の進歩によってさまざまな意思決定の自動化が可能となったが、意思決定アルゴリズムの公平性、透明性の確保は急務の課題でもある。五十嵐さんは、戦略的創造研究推進事業さきがけにおいて「信頼されるAI」という大テーマの下、「信頼される資源配分メカニズムの構築」に取り組んでいる。

題材の1つが、「複数の選択肢を選ぶ投票メカニズム」だ(図4)。投票メカニズムの代表的なものには多数決があるが、49人がAに、51人がBに投票した場合、49人の意見は無視されることになってしまう。「多数決で1つしか選べないのであれば仕方ありません。対して、ABCDの候補の中から複数のものを選ぶとした場合に、Aに投票した49人が選んだもの、



家事分担アプリの開発に携わったことで、公平配分を生かすための視野が広がりました。日常の暮らしに潜む疑問や齟齬を、数学の力で読み解いていきたいと思っています。

イノベ 見て歩き

連載：第1回

廃プラスチックを高度に選別する装置 大学発ベンチャーで製品化を目指す

田邊 匡生

Tanabe Tadao

芝浦工業大学 デザイン工学部 デザイン工学科 教授
2021年よりSTART研究代表者

社会実装につながるイノベーションに挑む研究開発現場を訪ねる新連載「イノベ見て歩き」。第1回目は、電波と光の性質を併せ持つテラヘルツ波を使って多種多様な廃プラスチックを高度に選別する装置を開発し、大学発ベンチャーとして製品化を目指す芝浦工業大学デザイン工学部の田邊匡生教授の取り組みを紹介する。

可視化できるテラヘルツ波 社会課題の解決にしたい

オフィスビルやタワーマンションが立ち並ぶ東京ベイエリアにそびえ立つ14階建ての芝浦工業大学豊洲キャンパス。デザイン工学部の研究室は、ガラス張りのフロアに斬新なデザインのデスクやチェアが配置され、学生たちの表情は生き生きとしている。工学系の研究室といえば配管むき出しの灰色という固定観念を一掃するスタイリッシュな空間だ。

「デザイン工学部は、社会的課題の解決にもフォーカスしています。都市におけるモノやコトを支えるデザイン技術をテーマに掲げ、その1つと

して材料技術やシステム技術などを結集し、未来に向けた社会課題の解決をターゲットとしています。廃プラスチック問題も、社会が抱える極めて重要なテーマです」と語るのは、芝浦工業大学デザイン工学部デザイン工学科の田邊匡生教授だ。

田邊さんが廃プラスチック問題に取り組むのは、2002年の東北大学大学院工学研究科の助手時代に半導体結晶を用いてテラヘルツ波の発振に成功したことがきっかけだ。携帯電話に使用されているギガヘルツ波より周波数が3桁高いテラヘルツ波は、透過性のある電波と直進性のある光の性質を併せ持っている(図1)。「テラヘルツ波を使うと、見えないものを

見ることができます。これを社会課題の解決に使えないかというシーズ型研究が出发点となりました」。

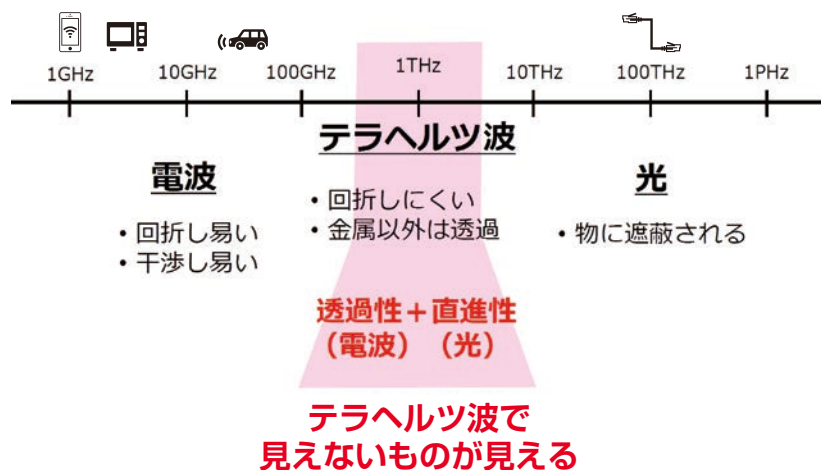
これまで電線ケーブルの内部を調べる非破壊検査や、繊維素材を識別する分光装置などへの応用に向けて試行錯誤を重ねてきた。研究の過程で、電線の被覆素材をはじめプラスチックの種類によってテラヘルツ波の透過吸収率が異なることも確かめている。

SCOREでの研究開発を通して 事業性は十分にあると確認

近年、廃プラスチックによる海洋汚染などが地球環境問題として注目を集めているが、その適正処理とリサイクルが持続可能な社会づくりには欠かせない。しかし、一口にプラスチックといっても、ポリエチレン(PE)、ポリスチレン(PS)、ポリプロピレン(PP)、ポリエチレンテレフタレート(PET)などさまざまな種類がある。これらを効率よく選別できないとリサイクル素材として活用できず、結局は廃棄されてしまう。

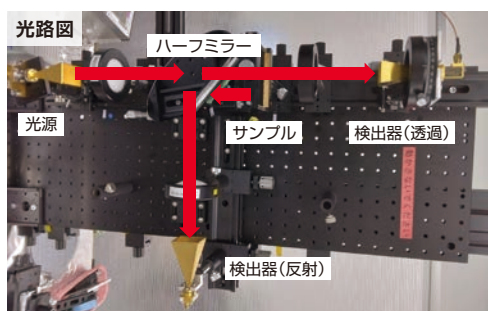
田邊さんは、テラヘルツ波によるプラスチックの高度識別を目指し、19年にJSTの社会還元加速プログラム(SCORE)に応募した。研究では、0.5~7テラヘルツにかけての広帯域テラヘルツ波の透過吸収スペク

図1 テラヘルツ波の特徴

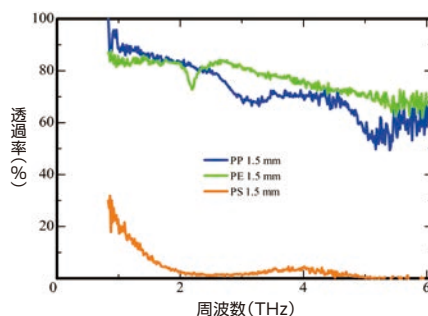


障害物に遮られ回折・干渉を受けやすい電波と比較して、テラヘルツ波は回折しにくく、金属以外を透過する。また、対プラスチックにおいてもテラヘルツ波の誘電率が素材ごとに異なるため、細かな識別・選別が可能だ。

図2 テラヘルツ透過／反射測定装置



測定装置では、対象(サンプル)へ発信したテラヘルツ波の透過率と反射率の差から素材を識別する(左)。PE、PP、PSの透過吸収スペクトル(厚さ:1.5ミリメートル)の測定により、吸収強度の違いや特徴的なピークを確認できた(右)。



トルを分析することで、PE、PS、PPなどの識別ができるだけでなく、プラスチックの劣化状態や金属の混入も見つけられることを立証(図2)。一方で、リサイクル企業の現場を視察したり、実際にインドに訪れてスクラップから金属を回収するために廃プラスチックを焼却・不法投棄している現状を見て回ったりした。「問題解決のためには選別精度の向上が必要です。単一素材のペットボトルはリサイクルが確立していますが、PE、PS、PPの分別率は70パーセント程度にとどまっており、品質面から用途も限られています。SCOREを通じて、私たちの高度選別システムが十分に事業性を持つことを確かめることができました」。

最初の目標は「店舗型選別機」 スーパーで実証実験

21年度からは、SCOREで培った人脈も生かして東北大学の劉庭秀教授と眞子岳特任講師、静岡大学の佐々木哲朗教授とともに、大学発新産業創出プログラム(START)プロジェクト推進型「プラスチック製容器包装廃棄物の高度選別装置の事業化」の取り組みを開始した。選別装置の開発では、人が目視で行っている選別現場の実情を踏まえた機械学習を組み合わせることで、高度識別が期待できるアルゴリズムも開発(図3)。廃プラ混合物を搬送するベルト

コンベア、選別装置などを一体化した試作機を制作し、展示会への出品も果たしている。

実際に稼働する試作機の反響は絶大だった。多くのメディアに取り上げられ、リサイクル事業者や流通企業などから100件を超える問い合わせがあり、うち26件が具体的な交渉に入っている。ベンチャー企業設立も予定しているとのことだ。

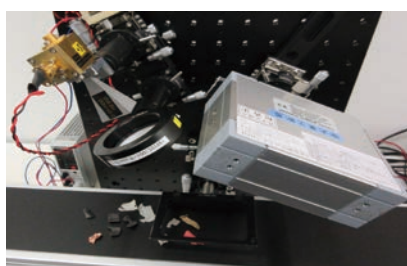
ベンチャーの最初の目標として、田邊さんは「店舗型選別機」を挙げる。「スーパーやコンビニにはペットボトルの回収機が導入されています。

しかし、弁当や総菜の容器などはPE、PS、PP製が混じっており、色や形もさまざまです。私たちの高度選別機は透明・着色を問わずPE、PS、PPを選別でき、リサイクルに適さない添加剤を含んだプラスチックの判別も可能です。現在、分別機器メーカーに協力いただいてプロトタイプの開発を進めており、スーパーでの実証実験を始めています。また、デザイン工学部の他の研究室の協力を得て、店頭設置にふさわしいデザイン設計にも取り組んでおり、実用的な装置開発を目指しています」。

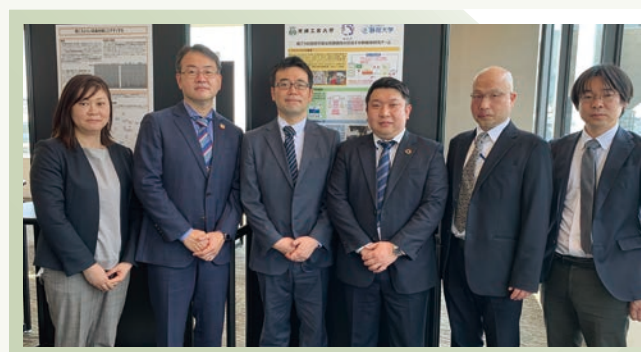
SCORE、STARTでは、都市問題の専門家、リサイクル関係者、流通事業者などと幅広い交流を持つことができ、現場の経験が新たな知見につながったと振り返る田邊さん。今後は、産業廃プラ選別機や一般ごみ選別機の開発に挑戦し、リサイクルしやすい容器やラベルの素材・形状の提案も視野に入れた展開を見据えている。

(TEXT:森部信次、PHOTO:石原秀樹)

図3 プラスチック製容器や包装の識別



ベルトコンベア上の対象をテラヘルツカメラで撮影・測定し、材質を識別する。リサイクル現場での実証実験では、特定のプラスチック素材を選別する装置の高い性能を確認した。



東京ビッグサイトで開催されたピッチイベントでの、プロジェクトメンバーとの集合写真(左から3人目が田邊さん)。

ロボットは褒めの伝播と循環を生み出す 人との交流影響を実験、安心感の向上などに期待

学校での教育支援ロボットや飲食店のロボット店員をはじめとして、新型コロナウイルス感染症を機にロボットがより身近な存在になっています。国際電気通信基礎技術研究所インタラクション科学研究所の塩見昌裕室長らは、ロボットとの交流が人にもたらす影響を調べる実験を行いました。

まず、人の行う単調な作業をロボットが①褒める②中立的な意見を述べる③あおるの3パターンで対応した際の人への影響を比較しました。その結果、①と③では同程度にパフォーマンスが向上しましたが、③の場合は不安を増加させてしまうことがわかりました。また、ロボットに褒められていた人たちは、別の参加者を褒めなくなることも明らかになりました。

研究チームはさらに、ロボット店員が注文商品を落としてしまったミスに謝罪した時の人の反応も調査しました。具体的には、失敗したロボットが1台だけで謝る場合

と、別のロボットと一緒に2台で謝る様子を動画で再現し、Web上でアンケートを実施しました。その結果、1台よりも2台で謝った方が謝罪を受け入れ、ロボットを有能だと感じる事が明らかになりました。また、2台目のロボットが①謝罪のみ②片付けの準備だけをする③謝罪後に片付けの準備をする場合では、③が最も好意的に評価されました。

研究結果から、ロボットという人工物であっても人の感情や行動に影響を与えることが示されました。こうした知見は、ロボットを起点とした褒めの伝播と循環による社会全体のパフォーマンスや安心感の向上、ロボットと人がともに生活するための社会設計などに生かされることが期待されます。



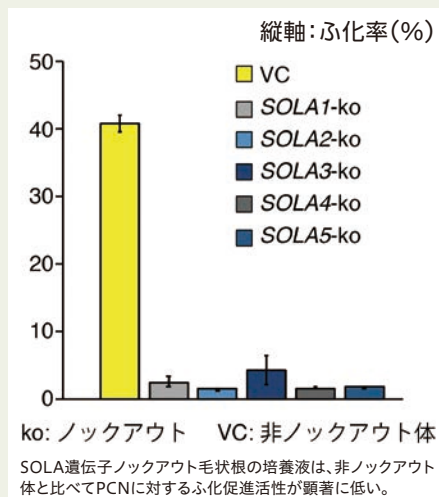
センチュウ類の新規ふ化促進物質を発見 防除法開発のカギ、持続可能な農業生産へ

作物の根に寄生して養水分を奪うジャガイモシストセンチュウ類(PCN)は、食糧生産において世界中で深刻な被害を与えています。PCNの卵は厳しい環境や殺線虫剤などに高い耐性を持つ硬い殻に守られていて、宿主の根から分泌されるふ化促進物質(HF)に反応して一斉にふ化し、寄生するため防除が困難です。この特性を利用した防除法が検討されてきましたが、天然HFの存在量は微量で1990年代にソラノエクレピンA(SEA)が発見されて以降報告がなく、そのため防除法の開発もあまり進展が見られませんでした。

今回、神戸大学大学院農学研究科の秋山遼太研究員らは、約7万リットルのジャガイモ水耕栽培廃液からHFをさまざまな手法で分画・精製し、最終的に2つのHFの精製に成功しました。そのうち1つがSEA、もう一方は新規ふ化促進物質であることを明らかにし、ソラノエクレピンB(SEB)と命名しました。さらに、土壌中の微生物によりSEBがSEAに変換されることも明らかにしました。また、SEBは植物自身が生合成する化合物であることがわかったため、扱いやすいトマト毛状根をさまざまな条件で培養してHF生産量が変化する

条件を複数見だし、その変化と遺伝子発現が同調する遺伝子を選抜しました。ゲノム編集技術でこれらの遺伝子のノックアウト毛状根を作成し、分析した結果、SEB生合成に関与する5つの遺伝子を世界で初めて発見しました。

この成果は、SEB生合成遺伝子をノックアウトすることでPCNをふ化させない新たな品種の植物育成への道を切り開きます。今後は生合成遺伝子を明らかにしてHFを多量に異種生産すると、宿主不在時にPCNをふ化して餓死させる自殺ふ化剤として利用できる可能性があります。これにより、持続可能な農業生産に大きく貢献することが望まれます。



「期待外れ」を乗り越えるドーパミン細胞

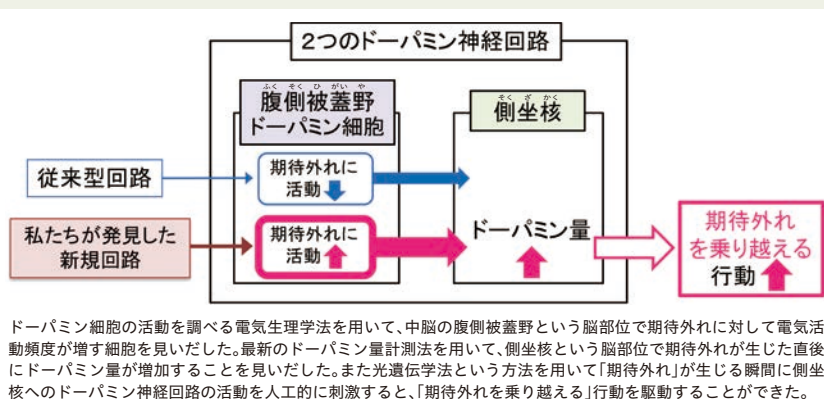
意欲の異常をきたす精神・神経疾患の治療に道

私たちは現状よりも高い目標の達成を目指し、途中で「期待外れ」が生じて、それを乗り越えようと努力します。また動物も、採餌行動や求愛行動の中で期待外れを乗り越えられるか否かが生存や繁殖に影響します。従来、意欲に重要な脳内のドーパミン放出量は思ったよりうまくいくと増える一方、期待が外れると減ると考えられていました。しかし、期待外れを乗り越える能力については説明できていませんでした。

京都大学医学研究科の小川正晃特定准教授らの研究グループは、期待外れに対して活動が増すようなドーパミン細胞が存在するのではないかという仮説を立て、確率的に得られる報酬をラットが能動的に求め続けるように訓練し、ドーパミン神経細胞の活動を計測しました。その結果、期待する報酬がたまたま得られない「期待外れ」な状況となってもラットは次の報酬獲得に向けて行動を切り替えるようになり、その際に活動を増すドー

パミン細胞を発見しました。また、ドーパミン細胞の投射先である側坐核と呼ばれる脳の部位で、期待外れが生じた直後にドーパミン放出が増えることを見いだしました。さらに、期待外れが生じる瞬間にこの側坐核へのドーパミン神経回路を人工的に刺激すると、次の報酬獲得に向けた行動が増すことを明らかにしました。

この研究はドーパミンの新たな役割を解明し、意欲を支える脳の仕組みの常識を変える革新的な成果をもたらしました。将来的には、うつ病や依存症など、意欲の異常をきたす精神・神経疾患の理解や治療法の開発への貢献が見込まれます。



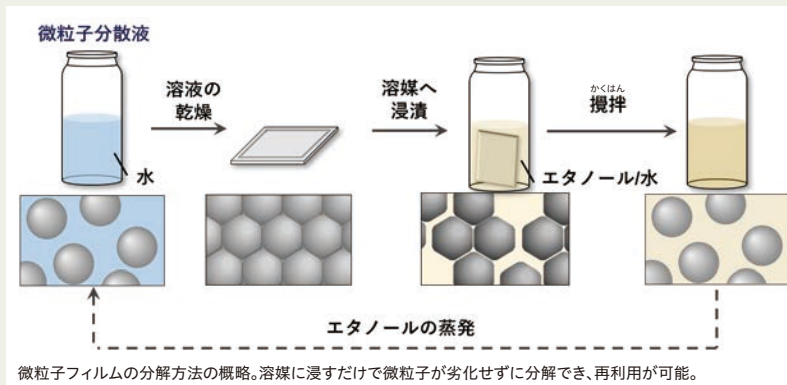
高分子微粒子でリサイクル手法を開発

安全で効率的な循環型社会の構築に貢献

スマートフォンやパソコン、衣類に至るまで日常のあらゆる場面で使用されている高分子材料は高機能化が進み、世界的に生産量が増大しています。その結果、海洋に流出する高分子ゴミだけでも年間数百万トンにも上るほど廃棄量が激増し、環境や生態系に悪影響を与えています。そのため、高分子の特性を劣化させずに同じ素材として繰り返し再利用できる「クローズドループリサイクル」が望まれています。

信州大学学術研究院の鈴木大介准教授らの研究グループは、使用済みの高分子材料を溶媒に浸すだけで元の微粒子にまで分解でき、用途に合わせて何度でも色や力学特性を調整可能な高分子フィルムを開発しました。特殊な化学原料を用いることなく、接着剤や塗料に多く使用されるメチルアクリレートを材料とした高分子フィルムは、溶媒を乾燥させることで容易に作成することができ、その強度は粒子界面を補強した天然ゴムフィルムに匹敵します。

分解に使うのはエタノールと水の混合溶媒であり、毒性は低く環境に優しいという特徴があります。高分子フィルムの分解後は数十から数百ナノメートル程度のサイズの微粒子で、高分子鎖が壊れないため元の高分子材料と遜色ない力学特性を持ちます。さらに約99パーセントという高い材料回収率を持ったクローズドループリサイクルが実現可能です。本研究で見いだされた安全かつ効率的なマテリアルリサイクルは、高分子ゴミの減少や希少材料の再利用といった観点からも高い有用性が認められ、世界的な課題である循環型社会の構築に貢献します。



さきがける 科学人

vol.128

末次 健司 Suetsugu Kenji

神戸大学 大学院理学研究科 生物学専攻 教授(卓越教授)

Profile

奈良県出身。2014年京都大学大学院人間環境研究科相關環境学専攻博士後期課程修了。博士(人間・環境学)。京都大学白眉センター特定助教、神戸大学大学院理学研究科生物学専攻生物多様性講座特命講師などを経て、22年より現職。21年よりさきがけ研究者。



20年に及ぶ調査を経て発見した新種のギンリョウソウ。最初の発見場所である霧島を冠し「キリシマギンリョウソウ」と命名しました。

Q1. 生物学に進んだ動機は？

A1. 春日山で植物や昆虫を観察 不思議な「だましとせめぎ合い」

物心ついた時から生き物が好きで、家の近所にあった春日山原始林で多種多様な植物や昆虫を観察していました。帰宅後も生物図鑑を読みふける日々の中で、自然と将来は生物学の研究者になるものだと思っていました。

大学で植物に寄生する植物を研究したことがきっかけで、動植物間の寄生・共生関係に強い興味を抱きました。特に、進化の過程で光合成をやめた菌従属栄養植物の「ギンリョウソウ」は不思議な存在でした。菌従属栄養植物は菌類を「だまし」、窒素や糖などの栄養分を奪う一方で、菌類には何も与えません。通常の植物は、相手側から受け取る利益が減ると与える利益を減らします。なぜ菌類は搾取を黙認しているのか不思議ですよね。この「だましとせめぎ合いのメカニズム」を解明するべく、形態学や生態学、遺伝子解析などの多角的な見地から研究しています。

Q2. 特に思い入れのある成果は？

A2. 絶滅？「妖精のランブ」を発見 全国各地にいる協力者が支え

光合成をやめた植物の不思議に目を向けるきっかけとなった「ギンリョウソウ」の新種を発見したことも最近の思い入れのある成果です。ですが特に印象深い成果は、2018年に新種として名づけた菌従属栄養植物「コウベタヌキノショクダイ」の再発見です。「妖精のランブ」とも呼ばれるこの植物は、世界中を見ても、92年に神戸市で採集された花の一部が欠けた標本の一個体が博物館に収蔵されているだけでした。

その採集地は開発のため消失したとされており、コウベタヌキノショクダイも絶滅してしまったと考えられていました。だからこそ、21年に偶然自生しているこの美しい植物に遭遇した驚きと感動は今でも忘れられません。国内外のメディアや一般の人々からも大変な反響があり、謎に包まれたタヌキノショクダイの仲間を始めとする光合成をやめた植物の実態を解明する意欲が高まりました。

とはいっても、光合成をやめた植物は、生きた植物と共生している菌類に寄生しているケースが多く、その栽培は困難を極め

ます。もちろんラボで研究できることは大きな利点なので、栽培系の構築にも力を入れています。野外でしかわからないこともたくさんあります。だからこそ、フィールドワークは非常に重要です。今は大学生時代ほど頻繁に野外に行くのは難しいのですが、全国各地にいる協力者のおかげで、効率的に研究できています。その恩返しの一環として、絶滅危惧植物や自然環境の保全にも取り組んでいます。

Q3. 研究者を目指す皆さんへ一言

A3. 物事を「見る目」を養おう 独自の視点と熱意を持って

近頃は高校生でも専門的な調査や実験ができる機会が増えてきていますが、研究は大学入学後でもできるので、まずは物事を「見る目」を養ってほしいと思います。特に自然相手の研究では、対象をとことん観察し続けることが大切で、それが大発見につながる例も少なくありません。自分が興味を持ったものを地道にじっくり突き詰めていけば、必ず面白いことや、新たな疑問が見つかります。独自の視点と熱意を持って、日々の活動に取り組んでいってください。

(TEXT:横井まなみ)

光合成をやめた
菌従属栄養植物の
謎に迫る



「コウベタヌキノショクダイ」。絶滅宣言から30年以上を経て、兵庫県の森林で発見しました。

