

JST 未来をひらく科学技術 news

特集

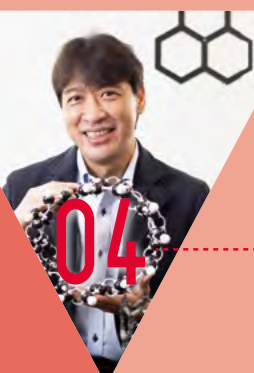
夢の分子で世界を変える

宇宙を読み解くビッグデータ

1

January
2019





03 新年のごあいさつ

特集1

夢の分子で世界を変える



表紙解説

世界で初めてカーボンナノベルトの合成に成功した名古屋大学の伊丹健一郎教授。熱い思いと優れたリーダーシップで多彩な研究者の力を結集し、12年の歳月をかけて成し遂げた。アイデアの源泉は、少年時代に夢中になったレゴブロックやドラえもん。「どんな小さなことでもユニークに生きれば、もっと面白くてワクワクする社会になる」と、新年の幕開けに夢ある未来を描く。



特集2

宇宙を読み解くビッグデータ



数字に見る科学と未来

1マイクロ秒で機能を切り替え
低消費エネルギーの
小型ガスセンサー



NEWS & TOPICS

「ぱっと開く笑顔」や「おふざけ顔」
表情豊かな子供型アンドロイド
ロボットを開発 ほか

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。



さきがける科学人

80年以上前の化学を復活させ
環境負荷の低減を目指す

群馬大学 大学院理工学府
群馬大学 食健康科学教育研究センター
助教 橘 熊野

編集長：上野茂幸
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



新年の
ごあいさつ

今年は「科学と科学的知識の利用に関する世界宣言」、いわゆるブダペスト宣言が世界科学会議で採択されてから20年にあたります。

宣言では、21世紀の科学の責務として、それまでの「知識のための科学」の他、「平和のための科学」「開発のための科学」「社会における科学と社会のための科学」という4つの概念が示され、科学技術の社会に対する責務が初めて明確化されました。

その背景には、科学技術の発展が経済的な恩恵をもたらす一方で、環境問題などの地球規模の課題をも生み出し、持続可能で健全な環境の維持が危ぶまれていたことがあります。2015年には「持続可能な開発目標(SDGs)」が国連で設定され、ブダペスト宣言から20年が経過する現在でも、科学技術に解決が求められる課題はさらに広がり、深まっています。

わが国の科学技術政策を推進する中核的機関として、JSTは先端的な基礎研究を推進するとともに、社会の要請に応える課題解決型の研究開発に取り組んでいます。その中で、持続可能な社会の実現に貢献してまいります。

JSTは、急速に変容する社会に対応し、日本にイノベーションをもたらす新たな潮流の起点となる独創的なネットワーク型研究所としての機能を確立すべく、組織改革のためのイニシアチブ「濱口プラン」を策定し、変革に挑戦してきました。

その挑戦の一端が、課題解決型の研究開発事業である「未来社会創造事業」の創設や、科学技術と社会をつなぎ未来を共創するためのオープン・プラットフォームづくりです。

ブダペスト宣言を採択した世界科学会議では、科学者のみならず、技術者、国会議員、ジャーナリスト、行政官、市民ら約1800人が集まり、議論に参加しました。JSTもプラットフォームやさまざまな事業を通じて産学官民と共創し、社会課題の解決に貢献してまいります。

今年は「濱口プラン」による改革に取り組んで3年の折り返し地点です。JSTがネットワーク型研究所として、社会により大きな付加価値を提供できるよう、ここからさらに改革を加速してまいります。

皆さまのご支援、ご協力をお願い申し上げます。

平成31年1月

濱口 道成

夢の分子で世界を変える

半世紀以上も化学者が挑み続けてきた「カーボンナノベルト」の合成が実現した。世界初の快挙を成し遂げたのは、名古屋大学大学院理学研究科の伊丹健一郎教授だ。この夢の分子はカーボンナノチューブの鑄型として、次世代材料と期待されるナノカーボン材料の精密合成や高機能化に道を拓く。

いたみ けんいちろう
伊丹 健一郎

名古屋大学 大学院理学研究科 教授
名古屋大学 トランスフォーマティブ生命分子研究所
拠点長・教授

1998年 京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。京都大学大学院工学研究科助手や名古屋大学物質科学国際研究センター准教授を経て、2008年より同大学院理学研究科教授。12年より同大トランスフォーマティブ生命分子研究所拠点長・教授。05~09年 さきがけ研究者。13年よりERATO伊丹分子ナノカーボンプロジェクト研究総括。

ベンゼンとの運命的な出会い 究極のものづくりの世界へ

レゴブロックに夢中だった少年が化学者の道を志したのは、ベンゼンとの出会いがきっかけだ。名古屋大学大学院理学研究科の伊丹健一郎教授は高校3年生の時、化学の授業で有機化合物の象徴ともいべき分子、「ベンゼン」を知った。

正六角形のベンゼン環に結合する6つの水素原子に、炭素や酸素をレゴブロックのように組み合わせると、医薬品や電子材料などの機能をもった物質に化ける。機能の宝庫であるベンゼンに伊丹さんは魅せられた。しかも分子と原子の組み合わせは無限大だ。自分の

アイデア次第で、今までなかった物質や価値を生み出せる。それまでの化学嫌いが「最高にクリエイティブな学問だ」と一変した。

分子が世界を変えた例は枚挙にいとまがない。「奇跡の薬」と呼ばれるペニシリンの抗菌作用の源は、特異な分子構造にある。「愛するベンゼンで、この世にたった1つしかない分子を作りたい」と、伊丹さんは合成化学という「究極のものづくり」の世界を走り始めた。

オンリーワンのアイデアで 未解決問題に挑戦

2004年秋、京都大学大学院工学研究科の助手だった伊丹さんののもとに、

思わぬ話が舞い込んできた。ノーベル化学賞を受賞した名古屋大学の野依良治特別教授が准教授を求めているという。世界に名だたる有機化学の最高峰で研究できる絶好のチャンスに心が躍った。

研究者人生を懸ける価値のあるオンリーワンの研究テーマを必死に考え、「純粋カーボンナノチューブの合成」という、ナノカーボン科学の未解決問題への挑戦を携えて、面接に臨んだ。

ナノカーボンはナノ(ナノは10億分の1)メートルサイズの炭素材料で、工学や生命科学などあらゆる分野に革新をもたらす次世代材料として注目されている(図1)。とりわけ筒状の炭素物質であるカーボンナノチューブは、鉄の

約20倍も硬いのに軽く、電気や熱を通しやすい性質をもつため、最も期待が大きい。

しかし、放電やレーザー照射など従来の物理的手法では、直径や炭素配列が不ぞろいで、性質が異なるカーボンナノチューブの混合物しか得られない。混合物からの分離や精製の手法も完璧ではない。直径や配列を自由に決められないばかりか、同じ構造のものを大量生産できないのだ。

フラーレン以外のナノカーボンは混合物問題に直面し、これがナノカーボンの分子科学的な理解や発展、産業への応用を妨げている。解決不可能といわれる難題にこそ果敢に挑んでいくのが、伊丹さんの研究スタイルだ。

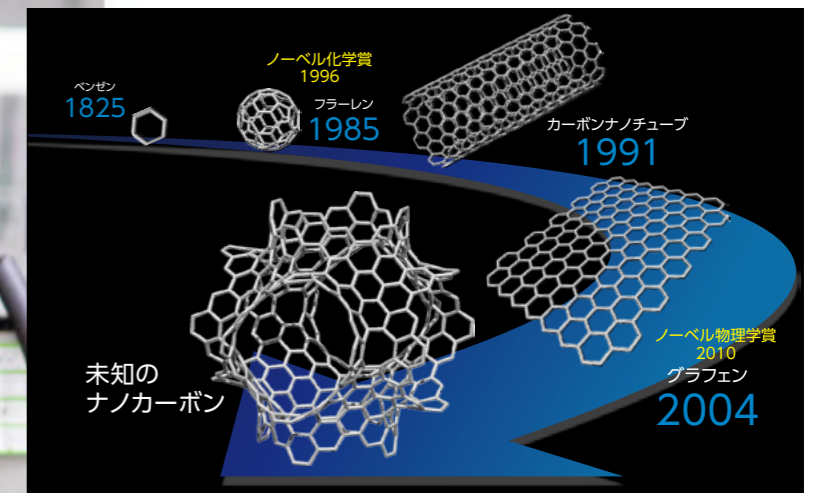
有機合成の力を信じて 三振を恐れずホームラン狙う

伊丹さんが披露したアイデアは、カーボンナノチューブの部分構造をもつ分子を有機合成の力で正確に合成し、これを鑄型にして単一構造のカーボンナノチューブを作り上げるというものだ。

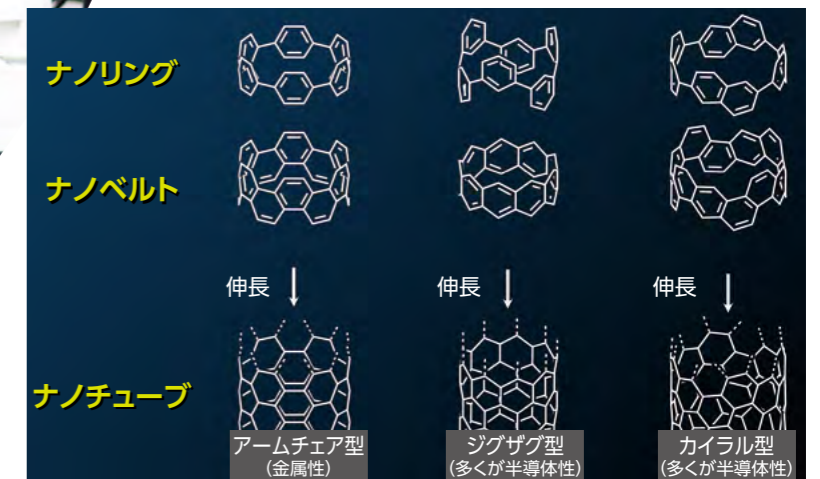
その鑄型が「カーボンナノリング」と「カーボンナノベルト」だ。いずれもカーボンナノチューブを短く輪切りしたような構造で、リングとベルトではベンゼン環の結合が異なる。鑄型に新たな炭素を順次結合させて、同じ構造のまま引き伸ばしていくことで、直径や配列がそろったカーボンナノチューブを合成

する(図2)。鑄型の種類を増やせば、特定の機能をもつ単一構造のカーボンナノチューブを作り分けられる。カーボンナノチューブの本来の機能を引き出すとともに、本格的な実用化を切り拓くに違いない。

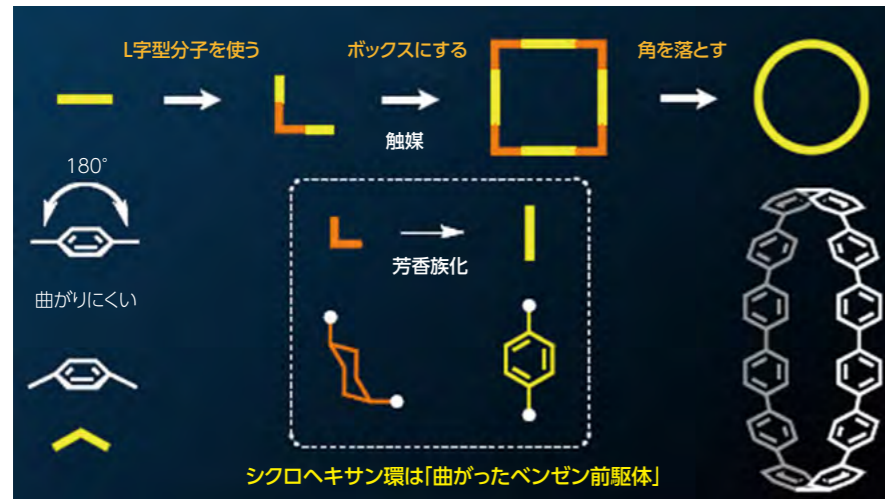
「無数の構造の混合物の集合体」を「構造的に純粋な分子」に変えようという、伊丹さんの言葉を借りれば「非常識な提案」に、野依特別教授は「美しい、そして大きなテーマだ。ここでフルスイングしないか」と答えた。名古屋大学に着任した2005年には、さきがけ「構造制御と機能」にも採択され、岡本佳男研究総括や領域アドバイザーから「三振してもいいからホームランを狙え」と励まされたという。



■図1 20世紀後半、炭素原子同士の新たな結合形態として、1985年に球状に結合したフラーレンが、1991年に筒状に連なった構造をしたカーボンナノチューブが、そして2004年にシート状平面構造をしたグラフェンが発見された。伊丹さんは、誰も作ったことがない未知のナノカーボンの合成を目指す。



■図2 カーボンナノチューブの形状は、アームチェア型、ジグザグ型、カイラル型の3種類に分けられ、それぞれ金属性や半導体性といった電気的性質が異なる。特定の構造のカーボンナノチューブを作るために、カーボンナノリングやカーボンナノベルトを鑄型にして伸ばしていく。



■図3 ベンゼン環とシクロヘキサン環からなる「L字型ブロック」と、ベンゼン環1つまたは2つからなる「直線型ブロック」を組み込む。

レゴブロックの発想がリング合成を成功に導く

カーボンナノリングは1930年代に、カーボンナノベルトは1950年代に、その存在が理論的に予想されたが、ノーベル賞受賞者をはじめ世界中の化学者の挑戦はことごとく退けられてきた。1991年にカーボンナノチューブが発見され、その部分構造であることが明らかになると、研究はますます活発化した。成功者は現れなかった。

ベンゼンは剛直な平面分子であるため、これを曲げるのは容易ではない。ベンゼン環が筒状になると、構造に大きなひずみが生じて不安定になる。いわば硬い板で筒を作るようなもので、合成は極めて困難とされてきた。

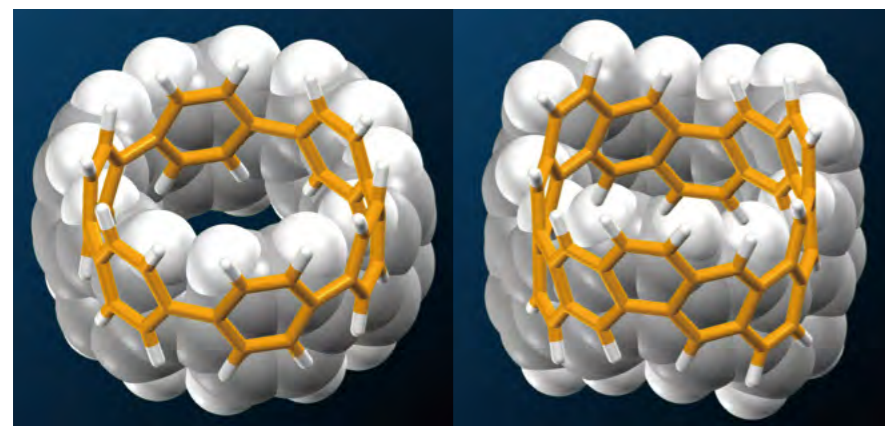
伊丹さんはレゴブロックの発想を取り入れた(図3)。L字型に曲がったシクロヘキサン環という炭化水素と、直線

のベンゼン環をつないで、四角い分子を合成する。次にL字型の部分で化学反応によってベンゼン環に変換させ、四角形の角を丸めてリングを作る。この方法の利点は、L字型ブロックと直線型ブロックを変えれば、リングの直径を自由に調整できることだ。

2009年1月30日の早朝、狙った直径でリングを合成することに世界で初めて成功した。「成功を知らせる電話がかかってきた時、さきがけ最終報告会の会場にいました。合成を証明するデータをプレゼン資料に急ぎよ盛り込み、数時間後に披露しました」。研究総括や領域アドバイザーが「あまりにもドラマチック」と驚くほどの展開だった。

「ベルト祭り」の大勝負 チームプレーで夢を実現

リングを鋳型として伸ばす方法で、



■図4 左:アームチェア型カーボンナノチューブを合成するためのカーボンナノリング(シクロパラフェニレン)。右:カーボンナノベルト。赤色の蛍光を発する有機分子で、発光材料や半導体材料として使える可能性がある。リングではベンゼン環同士が単結合でつながっているのに対し、ベルトでは辺を共有している。

2011年には直径がそろったカーボンナノチューブの合成に成功した。しかし収率が100パーセントではなかった。

ベンゼン環を結合1本でつなぎ合わせたリングは、カーボンナノチューブを合成する際に加わる500度以上もの高熱に耐えられず、結合が壊れたり構造が変化したりする(図4)。カーボンナノベルトなら、ベンゼン環同士が互いに辺を共有(縮環)し、筒状の構造を構成しているので、高い熱安定性が期待される。

早く合成しなければという思いが高まり、2013年に開始したERATOプロジェクトではベルトの合成を一番の目標に掲げた。合成化学者だけでなく応用物理や光化学、デバイスの専門家など幅広い分野の研究者を集めた。

合成への道のりは険しかった。多様な化学反応を試したが、ベルトがどんどん遠く感覚しか持てなかったという。

伊丹さんは一か八かの大勝負に出た。「ERATOプロジェクトや研究室のメンバーをベルト合成に数カ月集中させる決意をしました」。この短期決戦プランを「ベルト祭り」と名付けた。2015年9月28日、メンバー全員を集め、「ベルト合成を決して諦めない」と演説し、『ベルト祭り』の決行を宣言したのです。

Povie Guillaume(ポビー・ギヨム)博士研究員(当時)もベルト祭りに加わった一人だ。それまで模索していた合成経路はひずみをもつカーボンナノリングを経由するものだったが、瀬川泰知グループリーダーと共に新たに考案した上で筒状に変換する手法であった。

石油成分で安価なパラキシレンという炭化水素を出発原料とし、10段階の化学反応を繰り返して、ベンゼン環6個と架橋部位をもった環状分子を合成する。この環状分子には、筒状に縮環する炭素原子全てに臭素原子が結合している。最後に、ニッケル錯体を使って、臭素原子を炭素に置き換えることで炭素炭素結合を形成し、ベンゼン環同士をつなぎ合わせ、合計11段階の化学反応でひずみのない筒状のカーボンナノベルトに仕上げた(図5)。

得られた炭素分子は本当にカーボンナノベルトなのか。分子の形を完全に

確認できるX線結晶構造解析が待たれた。そして2016年9月28日、瀬川グループリーダーが解析ボタンを押すと、目の前のモニターに、カーボンナノベルトの完璧な構造が映し出された(図6)。構想から12年間、待ち望んだ瞬間だった。見守っていたメンバーからは雄叫びのような歓声が上がった。

「若手研究者が自分の研究の手を止めて全力投球し、たくさんの合成経路を提案してくれました。全員で勝ち取った成果です。この日はベルト祭り宣言からちょうど1年で、決して忘れることができない記念日となりました」。粘り強いチームプレーで起死回生のホームランが放たれた。

美しい分子には機能が宿る 人類と科学の栄光のために

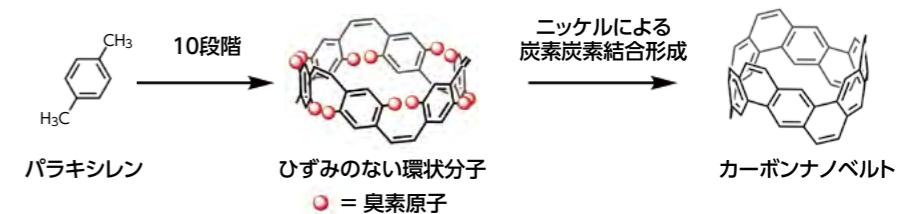
「歴史をひもとけば、新しい炭素の形の発見は、必ず新しい科学や技術を生み出してきました」。カーボンナノベルトの合成はゴールではなく、「始まりの第一歩」なのだ、伊丹さんは強調する。単一構造の純粋カーボンナノチューブの実現は、これからが本番だ。

伊丹さんは、同じく理論的研究から始まったフラーレンのような発展をカーボンナノベルトに期待している。「すぐに役立つようなものは、すぐに役立つなくなることがほとんどです。フラーレンが発見された当時、何の役に立つかを誰一人言えませんでした」。それが1990年代に大量合成法が開発されたことで、さまざまな研究者が研究できるようになったため、破格の物性や機能が続々と明らかになった。

論文発表から1年も経たないうちに、カーボンナノベルトは試薬会社から市



研究室の至るところに、ベンゼン環を連想させる正六角形のオブジェが飾られ、伊丹さんが作り上げてきた新しい形の分子模型が並び。



■図5 パラキシレンを炭素原料に用いて、初めにひずみのない環状分子(環状パラフェニレン)を合成する。環状分子は、筒状構造に縮環させる炭素原子全てに、反応性を高める臭素原子が結合するように設計されている。最終段階でニッケル錯体を用いて、炭素臭素結合を切断し、炭素炭素結合に変換することで、合計11段階の化学反応でカーボンナノベルトを構築した。

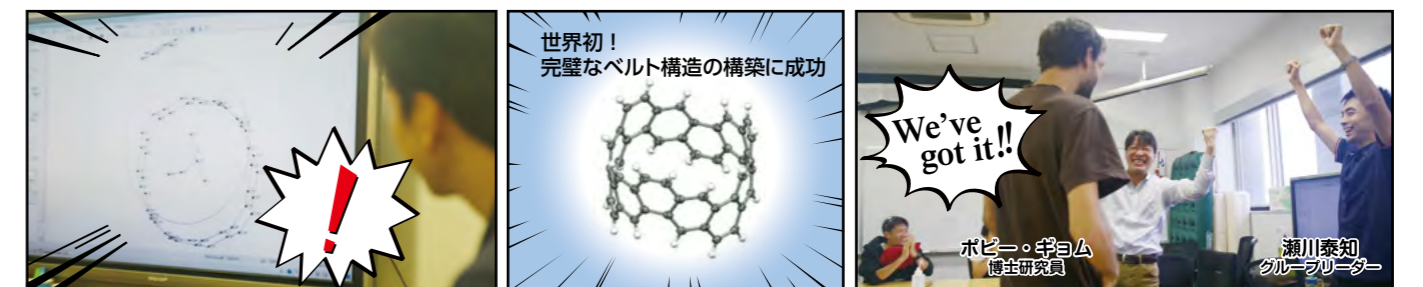
販された。「世界中の研究者の手に渡り、予想もしていない素晴らしい機能を見つけてもらえたら嬉しいですね」。

どんな小さなことでもユニークに生きる道を走ってきた伊丹さん。「世界を変える分子をつくる」という夢は変わらない。研究室の本棚には「ドラえもん」が全巻そろっている。「僕の教科書みたいなものです。ドラえもんのひみつ道具を実現する分子を作ったら、それは世界を変える分子だと思いませんか」。

「食糧やエネルギーなどの人類が抱える問題に答えを出し、新しい研究領

域を開拓するような分子を作ることがゴールです」。有機化学の枠を超えて異分野の研究者とも協働し、革新的な分子を追求している。

ERATOプロジェクトで開発した分子の数は100を超えた。「人間の知恵で作出した分子の形は美しく、人工知能は到底及びません。美しい分子には、必ず機能が宿ります。人類と科学の栄光のため、世界中の研究者が夢見てきたような、新しい形をもった美しい分子を作り続けていきます。分子がもつ「計り知れない力」を信じて――。



■図6 初めてカーボンナノベルトのX線結晶構造を目にした瞬間。思わずガッツポーズ、そしてハイタッチ。「We've got it!!」と喜びのツイートをした。この構造解析の一部始終を伊藤英人サブグループリーダーがひそかに撮影していた。「この日の最大のファインプレー」と伊丹さん。
<https://youtu.be/cABZla9w0uo>

宇宙を読み解くビッグデータ

この10年ほどの間に、人工知能(AI)の技術は大きく発展した。現在、自動運転、医療、金融などさまざまな分野で導入されている。この流れは、AIとあまり縁がなさそうな天文学の分野でも進んでいる。東京大学大学院理学系研究科の吉田直紀教授は、宇宙観測によって得られたビッグデータをAIによって分析し、宇宙の理解を深める「統計計算宇宙物理学」の創出に取り組んでいる。

変貌する天文学研究 観測データは膨大に

天文学という言葉から、一晩中、望遠鏡をのぞいて天体を観測する様子を思い浮かべる人も多いだろう。しかし、現代の天文学の現場では、そのような姿はほとんど見られない。

最先端の研究では、口径8メートル以上の大型望遠鏡を使うのが主流になっている。研究者が望遠鏡を直接のぞくのではなく、別室に設けられたコン

トロールルームで、たくさんの画像を撮影していく。

日本のすばる望遠鏡も8.2メートルの口径をもつ。ハワイの最高峰マウナケア山頂に設置された世界最高レベルの観測環境で、研究者が活躍している(図1)。

すばる望遠鏡の特徴は、さまざまな観測機器を取り付けられ、可視光から近赤外線まで幅広い観測ができることだ。特に、2012年8月から運用が始まった超広視野カメラのハイパー・シュプリーム・カム(HSC)では、満月10個

分の領域を一度に撮影できる。いわば、世界最大の「デジタルカメラ」だ。

ただし、HSCは視野が大きい分、データ量も大きくなる。市販されている一眼レフカメラで撮影した画像は大きいものでも5000万画素程度だが、HSCで撮影した画像は1枚で10億画素にもなる。夜空を一晩撮影するだけでも、得られる画像データは数百ギガ(10億)バイトだ。5年かけて取得する300夜分の観測データは、全部で25兆画素、1ペタ(1000兆)バイト分になるという。画像データには、およそ5億個の銀河、50万個のブラックホール、2万個の超新星が含まれる。

東京大学大学院理学系研究科の吉田直紀教授は、計算科学や統計学の手法を用いてこの膨大な天文データを解析し、宇宙の謎に迫ろうとしている。

コンピューターで 画像を素早く解析

1枚の画像データの中には、肉眼で見えるものだけでも数百個の天体が

よしだ なおき
吉田 直紀

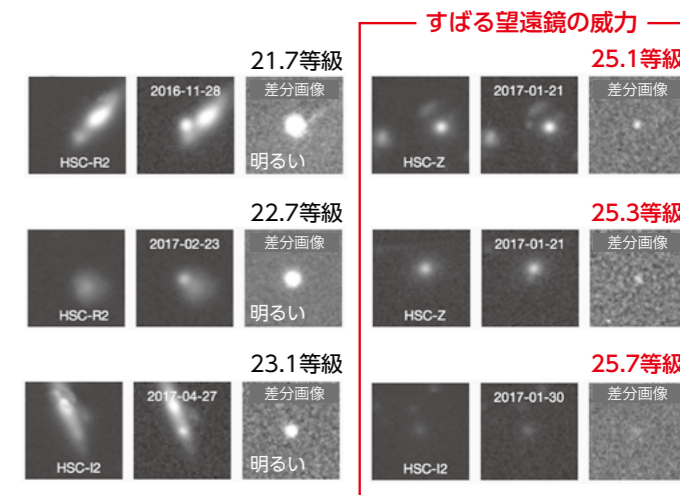
東京大学 大学院理学系研究科 教授

2002年 ドイツ マックスプランク宇宙物理学研究所博士課程修了。博士(天文学)。03年 国立天文台、04年 名古屋大学大学院理学研究科助手、08年 東京大学数物連携宇宙研究機構特任准教授を経て、12年より現職。国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 主任研究者・特任教授を兼務。14年よりCREST研究代表者。

写っている。肉眼では判別できない暗い天体まで含めると、その数は数千個にまで膨れ上がるという。吉田さんは「1枚の画像データに写っている天体を種類や形態、検出法などに従ってリストにまとめ、カタログ化するだけでも一苦労ですし、その中から科学的に面白いものを発見するのは、人の力では難しくなっています」と説明する。

そこで、注目したのがAI技術だ。コンピューター技術の発展に伴い、近年、AIによる画像解析技術は急速に性能を上げている。HSCの膨大な観測データを解析し、宇宙について新しい知見を得るために考えたのが、「統計計算宇宙物理学」という新たな学問領域だ。

「天文学では、観測と理論の両面から研究されてきました。観測データも増えているのですが、理論研究の方も、スーパーコンピューターによるシミュレーションが盛んになっていて、たくさんのデータが出てきます。膨大な量のデータを数学的に効率よく比較するためにも、最先端のデータサイエンスの手法を取り入れたいと思ったのです」。



■図2 AIが複数日の撮影画像の差分から超新星を見分ける。試行錯誤の結果、判別精度の向上に成功した。HSCの高解像度画像により2等級以上暗い超新星(赤枠内)の解析が可能になったことも、超新星の発見に大きく貢献した。

画像の差分から 超新星爆発を発見

超新星は、太陽よりも質量の大きな重い恒星が、その一生を終えるときに起こす大きな爆発のことで、超新星爆発とも呼ばれる。宇宙全体では3秒に1回の割合で起こっているとされるが、実際には宇宙の限られた領域しか観測できなかったため、従来の観測では一晩に数個が見つかる程度であった。

超新星爆発が起きているかどうかは、数日分の画像を見比べればわかる。例えば、前の日に撮影した画像と見比べて、明るさが変化した天体が見つければ、超新星爆発が生じた可能性がある。従来は人が異なる日に撮影されたデータを見比べて、1つ1つ探していたが、データ量が爆発的に増加ことにより、分析が追い付かなくなっていた。

吉田さんは、観測日の違う2つの画像の差分画像を作成することで、超新星爆発の候補を浮かび上がらせようと考えた。ここで活用したのがAIだ。観測画像や人工天体を含む2万4000個のデータから超新星爆発の画像の特徴を学んだAIが、データに含まれる多くのノイズの中から超新星爆発を起こした天体を発見するのだ(図2)。

■図1 すばる望遠鏡
標高4200メートルのハワイ島マウナケア山頂にある大型光学赤外線望遠鏡「すばる」。光を集める鏡の有効口径は世界最大級の8.2メートルで、高い鏡面精度を誇る。鏡の形状を最適に保つ制御機構や、空気の乱れを押さえる新型ドーム、観測装置の自動交換システムなど、解像度や観測効率向上のための多くの工夫が施されている。© 国立天文台

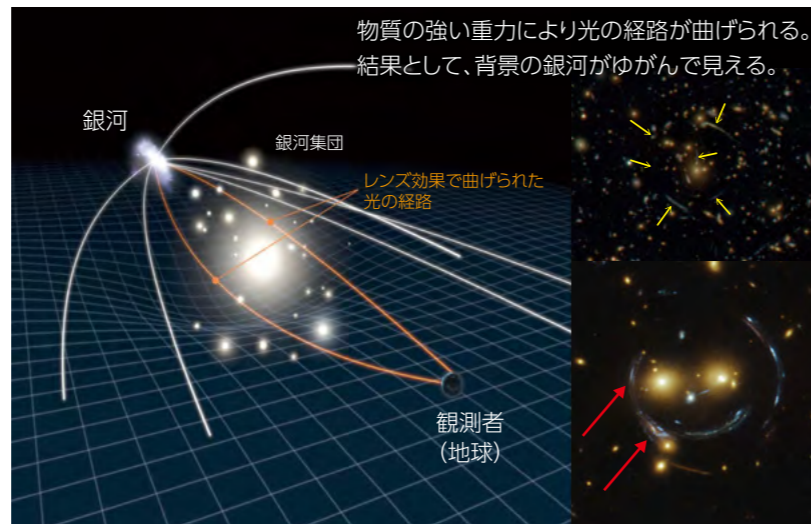
変化の特徴からIa型を選別 宇宙の歴史を知る手掛かりに

超新星爆発にはいくつかの種類がある。中でも「Ia型超新星爆発(Ia型)」はピーク時の明るさが一定で、観測されるIa型の見かけの明るさから地球からの距離を見積もることができる。2011年にノーベル物理学賞を受賞した宇宙の加速的膨張の発見は、Ia型の観測による成果だ。天体までの距離を測る「宇宙の物差し」として、宇宙が進化してきた様子を知り、未来を予測する上で重要な観測対象となっている。吉田さんは、機械学習によって発見した超新星爆発の中からIa型のみを選び出すことにも成功した。

「Ia型は、いったん、明るく光った後に、数日から10日ほどで急激に暗くなるという特徴を持っています。コンピューターは2万4000個の人工天体データから、そういったIa型の特徴を学びます。その結果、数日間隔で撮影した画像をコンピューターに読み込むと、Ia型かどうかを瞬時に判断してくれるようになったのです」。

AIの利用により、変動が見られた6万5000個の天体のうち、1824個が超新星爆発であることが突き止められた(図3)。さらに、これらを分類し、25個のIa型を確認した。いずれも地球から94億光年以上離れている。天体からの光が地球に届くまで時間がかかるため、

■図3 膨大な画像の中から、一晩で数十個の超新星を発見した。人の目では不可能なペースだ。



■図4 重力レンズ効果の模式図(左)とすばる望遠鏡で撮影された重力レンズ効果(右)。観測者と銀河の間に大きな質量をもつ物体が存在すると、重力の影響を受けた周囲の空間がゆがめられ、光の経路が曲げられる。その結果、銀河が弓状に変形して観察される(矢印)。©左・NASA/ESA & L. Calçada, 右上: 東京大学/国立天文台/大栗真宗助教(東京大学), 右下: NASA/ESA

私たちは過去の光を観察している。つまり、宇宙では遠くを見れば見るほど、過去の様子を知ることができるのだ。今回の観測で、遠くのIa型が多数発見されたので、この宇宙がこれまでどのように発展してきたのか、そして、今後どのようなようになってくのが、よりはっきりしてくる。場合によっては、宇宙に対する理解を大きく変えてしまう可能性も秘めている。

見えないダークマターの 空間分布をあぶり出す

CRESTでのもう1つのターゲットが、「ダークマター」だ。正体がまだ確認されていない謎の物質だが、宇宙の物質の大部分を占め、この宇宙が現在の状態になるのに大きく関わっているとされる。人には見ることも、触ることもで

きないが、吉田さんは「重力レンズ効果」という現象を利用して、ダークマターの宇宙空間での分布を明らかにしようとしている。

宇宙では、大きな質量がある場所は空間がゆがみ、光が真っすぐに進めずに曲がってしまうという現象が起こる。これを重力レンズ効果という(図4)。それにより、遠くに位置する銀河の姿は地球に届くまでにゆがんでしまう。

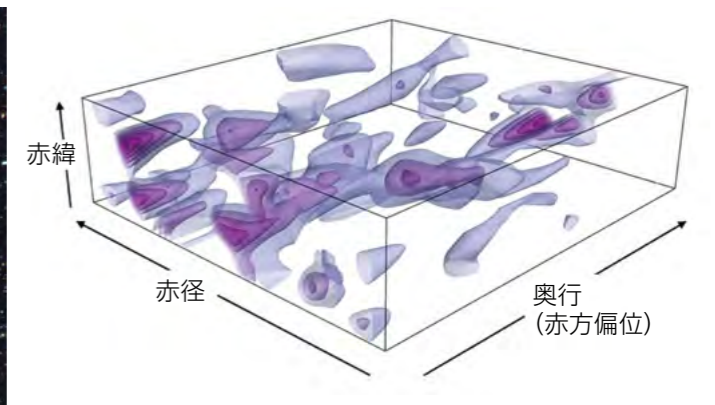
遠くの銀河の形がゆがむということは、その銀河から地球までの間に大量の質量をもつ物質があるということを示している。多くの場合、重力レンズ効果によって計算される質量は、望遠鏡で観測できる銀河の質量を上回る。つまり、計算された質量から、観測された銀河の質量を差し引いたものが、観測することのできないダークマターの質量ということになる。この考え方で、どの場所に、どのくらいの量のダークマターが存在するのかが徐々に明らかになってきた。

3次元地図で可視化 機械学習は試行錯誤

研究チームが開発したのは、HSC画像からダークマターの2次元分布を割り出し(図5)、それをさらに3次元地図として可視化する手法だ(図6)。HSCにより宇宙の広い範囲の画像を高解像度で得られる。この画像に写ってい



■図5 HSCで観測された天体画像の一部と、解析で得られたダークマターの2次元分布(等高線)。©国立天文台/HSC Project



■図6 ダークマターの3次元分布図。HSCの大集光力により、10億光年×2.5億光年の範囲、さらに奥行は約80光年という広大な天域での3次元分布が得られている。©東京大学/国立天文台/大栗真宗助教(東京大学)

る2000万個以上の銀河の形を解析し、そのゆがみ具合からダークマターの2次元分布を逆算する。重力レンズの効果による画像のゆがみは、観測点と銀河の間にダークマターが存在するときに最大になる。これを利用して、銀河の距離ごとに解析することで、2次元分布から3次元画像を再構築できる。

一方、機械学習を用いた解析手法により、2次元の画像データから個々の銀河に付随するダークマターの量を正確に推定することにも成功した。コンピューターの学習に用いたのは、天文学で過去に得られた銀河の形とダークマターの質量などを関連付けたデータだ。実験では、35万枚の画像を学習させ、ダークマターの量を瞬時に計算できるまでになった。

吉田さんは「これまでは、1つ1つの画像に対して、ダークマターの量を手作業に近い形で見積もっていたのですが、AIの場合は、正しく学習させれば、すぐに答えを返せるようになります」と、その威力を語る。

ただし、ここまで学習させるには試行錯誤を繰り返した。人の場合は、画像を見ただけで、どこに注目すればいいのかがすぐにわかるが、コンピューターの場合はそうはいかない。いくつかのフィルターを使い、色分けをして、コンピューターが認識しやすい状態を探っていった。「人とは理解の仕方が違うので、もどかしいところもありましたが、『赤い波長の遠くにある銀河は関

係があって、青い波長の近い銀河は関係がない』というように、どこに注目するのかを定義してあげると、正確な数値を計算するようになりました」。

ダークマターの3次元地図は、宇宙の構造や成り立ちに関する従来のモデルや理論を検証する重要な材料となる。可視光以外にも電波やX線データの利用や、機械学習手法の検討など改良を重ね、さらに精度を向上させる計画だ。

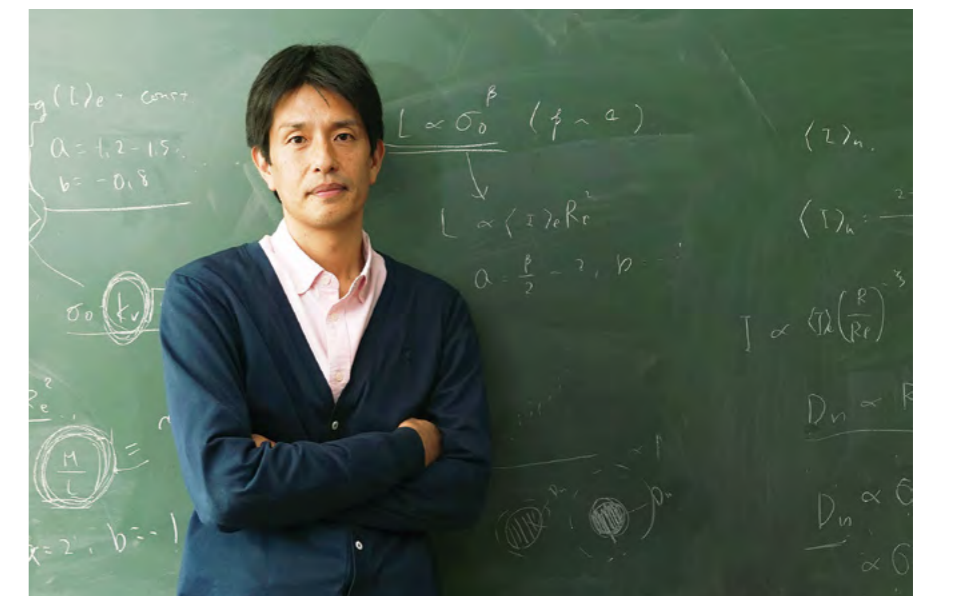
統計学との融合で 天文学を新たな領域へ

今後は、観測結果をシミュレーションの結果と直接照合するようにしていきたいと吉田さんは考えている。例えば、少しずつ違う理論に基づいたダークマ

ターの分布のシミュレーション結果と、今回得られたダークマターの3次元地図を比べれば、どの理論が正しいかが高い精度で判定できる。

「CRESTで取り組んでいることは、新しい分野の開拓です。天文学はもうAIのサポートなしには研究できない状況になっています。今は開拓中の技術ですが、将来の天文学の発展につながればと考えています」と吉田さんは期待を膨らませる。

天文学の世界は、今や夜空の星を観測するだけでなく、膨大な観測データから宇宙がどのように広がってきたのかを精密に推定する時代となった。他分野の多様な研究領域と同様、この宇宙をより精密に理解するためにもAIの手助けが必要だ。吉田さんたちは、その基礎を築いている。



9 4 0 6 . 1
数字に見る
科学と未来
Vol.5

1マイクロ秒で機能を切り替え 低消費エネルギーの 小型ガスセンサー

低消費エネルギーで駆動するガスセンサーをスマートフォンなどモバイル端末に搭載し、呼気による健康管理に利用しようと試みているのが、慶應義塾大学理工学部の内田建教授だ。ガスセンサーの電圧を制御して、検出する物質をたった1マイクロ秒で切り替え、異なる複数のガスを認識することに成功した。



うちだ けん
内田 建

慶應義塾大学 理工学部
教授

1995年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。博士(工学)。
95年 東芝研究開発センター、2003年 米国スタンフォード大学研究員、08年 東京工業大学大学院理工学研究科准教授を経て、12年より現職。18年より東京大学大学院工学系研究科教授(兼任)。

呼気に含まれる分子を検出 モバイル端末で健康管理

私たちが吐き出す息は、100種類以上のガス成分で構成されている。その組成は、私たちの代謝活動だけでなく、口内細菌や腸内細菌の活動と密接に関係している。人の代謝物としてガスが排出されるだけでなく、摂取した食べ物などを細菌が分解し、その代謝物としてもガスを排出しているのだ。もしこれらのガスの種類と濃度を日常的に計測できれば、健康管理に活用できる可能性が高い。

このような視点から、モバイル端末に搭載可能な小型・軽量かつ低消費エネルギーで駆動するガスセンサーの研究開発を進めているのが、慶應義塾大学理工学部の内田建教授だ。しかし、モバイル端末に搭載するには解決

すべき問題があるという。

「モバイルに搭載して健康管理に用いるには、ガス分子を精度良く認識できるだけでなく、省電力で動く小型センサーが必要です。そこで、10億分の1(ナノ)メートルのスケールで物質を自在に操るナノテクノロジーとLSI(集積回路)の製造技術を駆使することで、省エネルギー化、小型化、高性能化を一気に達成しようとしています」。

ナノスケール材料で エネルギー消費10億分の1

従来のガスセンサーは、化学反応を起こさせてガス分子の有無を検出する。そのためにはセンサー部分を約250度まで熱する必要があり、それが非常に大きなエネルギーを使う要因となっていた。この問題の解決につながったのがナノスケール材料だ。

金属などの伝導体に電流を流した時に、抵抗によって生じる熱エネルギーをジュール熱という。このジュール熱で自らを加熱するのがジュール自己加熱だ。

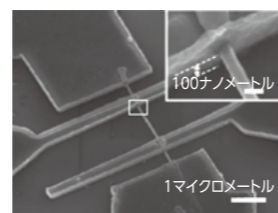
「一般に材料がナノスケールになると、熱伝導性が下がると熱容量も小さくなるので、ジュール自己加熱で十分に温まります。非常に短時間で高温になりますから、消費エネルギーを飛躍的に下

げることができるのです」と内田さん。

CRESTの研究メンバーでもある九州大学の柳田剛教授が中心となり開発した、数十ナノメートルのワイヤを使ったセンサーでは、従来のガスセンサーの約10億分の1のエネルギー消費量で化学反応を起こさせることに成功した(図1)。ただ、このセンサーはどんな分子でも酸化されるものなら認識するため、分子の種類まで特定することは難しかった。

グラフェンの温度を瞬時に調節 1つのセンサーに2つの機能

そこで、内田さんと田中貴久助教が同じジュール自己加熱の原理を使って開発したのが、呼気に含まれるわずかな水素を検出できるだけでなく、1マイクロ(100万分の1)秒の速さで水分検



サスペンデッドナノワイヤセンサー



透明基板
プラスチック基盤上におけるデバイス

■図1

ナノワイヤを使ったガスセンサー。酸化スズ製のナノワイヤを加熱することで、周囲のガスが酸化スズによって酸化され、ナノワイヤの電気伝導度が増える。それによりガスの有無がわかる。



出に切り替えられるというセンサーだ。肉眼では捉えられない蚊の羽ばたきでさえ1秒間に800回程度と考えると、その速さがイメージできるだろうか。その狙いを内田さんはこう説明する。

「1種類の分子を1つのセンサーで検出する場合、認識したい分子種の数だけセンサーが必要になります。モバイル端末への応用を見据えると、1つのセンサーで複数の分子を認識したいと考えました。1つのセンサーで1回の呼気に含まれる複数成分を同時に検出することは難しいですが、超高速で検出対象を切り替えられれば、それに近いデータは得られます」。

着目したのは、瞬時に温度を切り替えられるというジュール自己加熱の特徴だ。化学反応には高温で起こりやすい反応と、低温で起こりやすい反応がある。従来のセンサーでは温めるための時間がかかるため、温度を一定にして使っていたが、瞬時に温度を切り替えられれば複数の温度でセンサーを使うことができる。

そう考えた内田さんは、グラフェンと呼ばれる薄いシート状の炭素を用いたセンサーの開発に着手した。グラフェン

は分子スケールの厚さしかないため、これを使ったデバイスは、微量な分子の吸着による表面の変化でも高感度で検出可能だ。一方、熱伝導率も高いので、熱を容易に逃がしてしまうという難点もあった。瞬時に温度を上げるには発生した熱をとどめる工夫が必要だ。

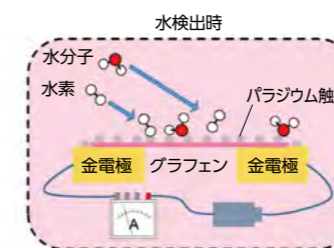
「周囲の物質に熱が逃げないように、2つの金電極間をグラフェンで橋渡ししました。さらに金電極表面に微細な凹凸を作り込み、金電極とグラフェンの接触面積を小さくすることで、グラフェンに瞬時に熱を集めることができました(図2)。

水素の検出を担うのはグラフェンにまぶしたナノサイズのパラジウム触媒だ。100度以上に温度を上げると触媒活性が高まり、水素分子が分裂してパラジウムとグラフェンの界面でイオン化し、電気抵抗が変化することで検出できる(図3)。この時、水分子は蒸発してパラジウムから離れるため、呼気のように多くの水分が含まれる気体であっても、わずかに含まれる水素が検出できるのだ。一方、低い温度では水分子がくっつき電気抵抗変化を生じて水分を検出できる。



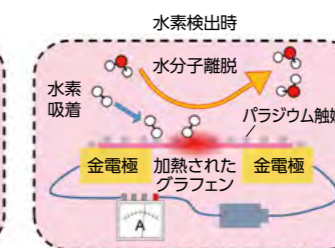
■図2

グラフェンを使ったセンサーの走査型電子顕微鏡写真。金電極間をグラフェンが橋渡しする構造になっている。



■図3

グラフェンの上には、パラジウム触媒のナノ粒子を載せている。低温では触媒としての活性がなくなるため、パラジウム周りに付いた酸素に水分が付きやすくなる。高温では吸着した水分が熱反応で離れるとともに、パラジウム触媒が活性化して付着した水素が水素イオンになる。グラフェンの抵抗値の変化から分子を検出する。ジュール自己加熱により、触媒の活性・不活性を制御して検出物質を切り替えている。



「電圧を変えるという単純な操作だけで一気に100度以上温度を上下させ、わずか1マイクロ秒ほどで機能を切り替えられます。センサーを小型化し複数を集積させることも重要ですが、1個のセンサーでも温度を高速で切り替えることで複数種類のガスを分離して検出できることがわかったので、新しい可能性が広がると期待しています」。

集積が生み出す新たな価値 世界を感じるLSIを目指す

このようなガスセンサーは、健康管理以外にも、大気中に含まれる汚染物質の検知などにも活用できる。食べ物の鮮度や傷み具合の検知、テロ対策など、応用の可能性は広がる。

「LSIの研究を続ける中で培った信念は、『数は力なり。集積化することで新たな価値が生まれる』ということです。これまでガスセンサーは集積化されていませんでしたが、ナノ材料を使い、小型化、省エネルギー化を進めることで集積化が可能になります。それにより、今後どのような新たな価値を生み出せるか、私自身とてもワクワクしています」。

従来、LSIにできるのは計算と記憶だと考えられてきた。内田さんは、世界を感じるLSIを作りたいと夢を語る。入力に対し答えを返すだけでなく、LSIが外界とつながり情報を収集する未来。センサーの研究はその第一歩だ。



測定室での内田さんと田中さん。

【CREST・さきがけ複合領域「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」報告会を開催】
本研究内容の紹介やデバイスのデモンストレーションに加え、多くの研究成果を紹介します。
日時：2019年1月30日(水)9:30~17:10 場所：東京大学駒場コンベンションホール(東京都目黒区)
URL：https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research/activity/1112063/poster_nanoeele3.pdf





研究成果

戦略的創造研究推進事業さきがけ
研究領域「新しい社会システムデザインに向けた情報基盤技術の創出」
研究課題「触れ合いデータを収集する子どもアンドロイド高機能化」

「ぱっと開く笑顔」や「おふざけ顔」
表情豊かな子供型アンドロイドロボットを開発

アンドロイドロボットの表情は、柔らかい顔被覆の内部に搭載された機構の動きを操ることで作り出されています。しかし、これまでは表面を精密に変形できず、表情の変化の過程に意味や感情など、ニュアンスを載せて幅を持たせることができませんでした。

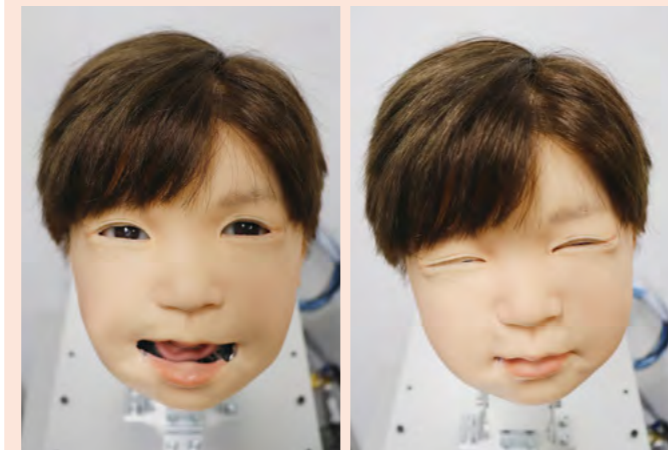
大阪大学大学院工学研究科の石原尚助教らは、子供型アンドロイドロボットの頭部を新たに開発し、皮膚の質感だけでなく、内部機構の可動部の数や動きの再現性の点でも性能を向上させました。

ロボットの大きさは2歳児相当。内部機構の動きに伴う顔表面の動きを精密に計測し、表面の操りやすさと変形の特徴を機構ごとに調べました。そして、笑顔の表現に最も適した3つの機構それぞ

れに対して表面の変形の特徴を考慮に入れた制御器を設けることで、無表情から笑顔に至る5パターンの表情の変化を作り分けることに成功しました。

今後は、細かいニュアンスが人にもどのように伝わり、コミュニケーションをいかに変えるかを調べることが可能になります。また、コミュニケーションロボットが状況に応じて情報をより効果的に、ニュー

アスを含んだ生き生きとした表情で人と交わることができることを期待されています。



子供型アンドロイドロボットの頭部(左:ぱっと開く笑顔、右:おふざけ顔)



研究成果

戦略的創造研究推進事業CREST
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「細胞内二次メッセンジャーの光操作開発と応用」

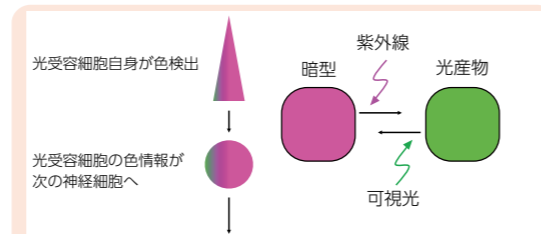
魚の脳器官で光の色を検出
色覚の起源にせまる

ヒトの目は網膜にある視細胞で光を感じて、赤、緑、青それぞれの光を感じる3種類の細胞によって色を見分けていますが、魚類などの脊椎動物では、目に加えて脳の表面に存在する松果体と呼ばれる器官でも色を検出します。この松果体は目と同じ細胞から分化しますが、色の検出の仕組みや役割は不明でした。

大阪市立大学大学院理学研究科の寺北明久教授らは、ゼブラフィッシュを用いて、最も重要な光感覚の1つである色の検出について、1種類の光受容たんぱく質を用いた非常に単純な仕組みを発見しました。これまで、色の検出は複数の光受容たんぱく質が必要と考えられてきましたが、その常識を覆す結果となりました。

研究グループは、松果体の光受容たんぱく質(パラピノプシン)に着目しました。同受容体は紫外線を受容すると可視光を受容できる状態(光産物)に変化し、可視光を受容すると元の紫外線光受容(暗型)に戻る性質を持っています(光相互変換型)。そこで、太陽光により似た条件を設定して詳細な実験を行ったところ、1つの受容体で暗型が紫外線光受容を担い、可視光に反応する光産物が可視光受容を担うことがわかりました。

「色を感じる」機能は、光受容たんぱく質などの進化に伴い獲得されたと考えられてきました。今回の発見は、パラピノプシンのような光相互変換型のたんぱく質



(左)松果体の光受容細胞では1つの光受容細胞が、1種類の光受容たんぱく質を用いて紫外線と可視光を検出する。(右)松果体の光受容たんぱく質(パラピノプシン)は暗型と光産物の2状態を光相互変換し、それぞれ紫外線と可視光(緑)をキャッチできる。

を含んでいれば色の識別が可能であることを示し、進化の側面からも注目されます。さらに、1種類の光受容たんぱく質による色検出システムは、光遺伝学にも応用でき、色で細胞や動物の行動をコントロールできるようになれば、生命機能解明への貢献も期待されます。



研究成果

戦略的創造研究推進事業CREST
研究領域「実用化を目指した組込みシステム用ディペンダブル・オペレーティングシステム」

CREST DEOSプロジェクトの成果を基に国際標準が制定
コンピューターシステムの信頼性向上へ

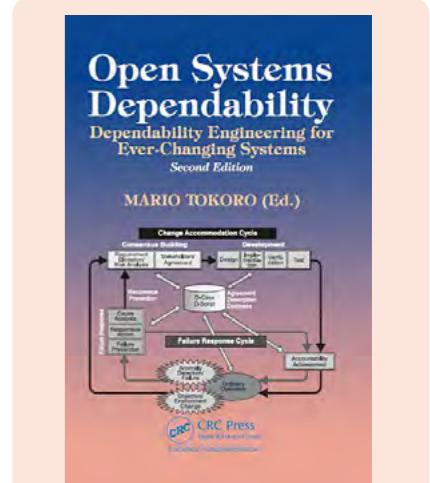
現代のコンピューターシステムは利用者の期待や環境、未知の障害など常にさまざまな変化に直面しています。システムが長期間サービスを提供するためには、これらの問題に対応し続けなければいけません。このような対応力を「オープン・システム・ディペンダビリティ(OSD: Open Systems Dependability, 開放系総合信頼性)」と呼びます。

2006年度に発足したCREST「実用化を目指した組込みシステム用ディペンダブル・オペレーティングシステム」研究領域(DEOSプロジェクト、所真理雄研究総括(2013年度終了))では、実際に広範囲に使用できる組込みシステム向けのオペレーティングシステム(OS)やディペンダブルな情報システムを構築す

るための基盤技術を開発してきました。2013年には、所研究総括が「一般社団法人ディペンダビリティ技術推進協会(DEOS協会)」を発足させ、研究開発成果が広く社会に利用され、世の中のシステムのディペンダビリティ向上に貢献する活動の一環として、国際標準化を推進してきました。

その結果、本技術の成果が2018年6月13日に国際標準「IEC 62853 Open systems dependability」として発行されました。DEOSプロジェクトでの成果がIoTやAI時代のシステムの信頼性向上に貢献することになります。中でも、OSDの合意プロセスや説明責任遂行プロセスが、自動運転での責任論など「解決の難しい社会問題」への有

効なアプローチになると期待されています。



DEOSプロジェクトの成果である、情報システムの信頼性を達成する方法について解説した書籍。



開催報告

サイエンスアゴラ連携企画

科学と社会のこれからを考える
サイエンスアゴラ in KOBEを共催

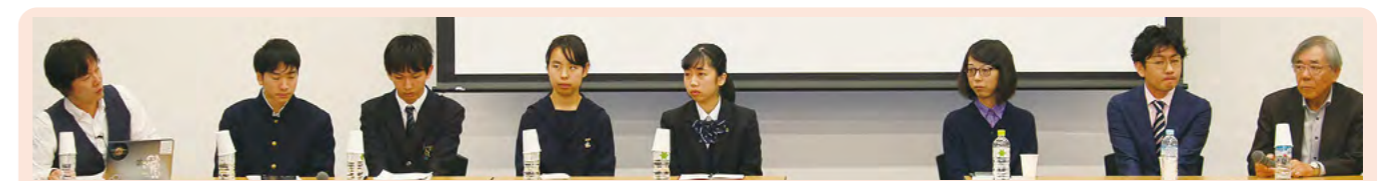
2018年11月23日(金・祝)に甲南大学ポートアイランドキャンパス(兵庫県)にて「サイエンスアゴラ in KOBE～科学・技術って誰のもの?～」を共催しました。

「科学と社会」推進部では、東京・お台場で毎年開催されるサイエンスアゴラの連携企画として、地方開催も展開しています。地域の課題を捉えた自律的な活動と連携し、地域における対話や協働の場を創出して提供することが目的です。

科学・技術は専門家の中で閉じたものではなく、社会の中でさまざまな形で活用されています。今後どのように活用し、発達させていくのか。最先端の研究者と高校生が一堂に会して、立場や世代を越えて科学と社会のこれからを共に考えました。

理化学研究所の竹市雅俊チームリーダーの基調講演「細胞がくっついたり離れたらー組織の維持と崩壊のしくみ」に続き、甲南大学の池田茂教授、神戸大学

の堀久美子助教、高校生代表4人(兵庫県立神戸高等学校、神戸市立六甲アイランド高等学校、神戸大学附属中等教育学校、甲南高等学校)がトークセッションを行いました。参加者約200人と満員の会場で、研究者と高校生が活発に意見交換しました。特に高校生の科学、技術に対する気付きの一助となったようです。多くの参加者から「大変有意義なイベントだった」といった声が聞かれました。



参加した高校生とのトークセッション(左から、ファシリテーターの本田隆行氏、高校生代表4人、神戸大学の堀久美子助教、甲南大学の池田茂教授、理化学研究所生命機能科学研究センターの高次構造形成研究チームの竹市雅俊チームリーダー)

Profile

大阪府出身。2004年 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。博士(工学)。和歌山県工業技術センター研究員、産業技術総合研究所特別研究員を経て、11年より現職。化石資源に頼らないクリーンで持続可能な高分子材料の生産を目指し、バイオマス化学産業における基盤技術を確立するべく研究に励む。



80年以上前の化学を復活させ 環境負荷の低減を目指す

群馬大学 大学院理工学府
群馬大学 食健康科学教育研究センター
助教

橘 熊野

Yuya Tachibana



Q 研究テーマを一言でいうと?

A バイオマス資源で、石油に代わる材料を作る。

バイオマス資源を使って、再生可能材料を作り出すことを目指しています。中でも着目しているのはトウモロコシの芯などから生産できるフルフラールという化合物です。その化学構造に含まれるフラン環の構造特性を生かして、石油由来のプラスチックの代替となる、安価で高機能な材料を生み出そうとしています。フルフラールは1940~50年代にも化成品の原料として使用されていました。しかし、石油との価格競争に敗れ、研究も長らく下火になっていました。決して目新しいものではないのですが、地球温暖化やマイクロプラスチックなど環境汚染への関心の高まりから、石油由来のプラスチックではなくバイオマス由来、さらには生分解性のプラスチックが注目されるようになりました。こうした化合物に環境負荷の低減という新たな付加価値を見いだせることに、化学の面白さや奥深さを感じています。

Q 現在の研究テーマに取り組んだきっかけは?

A 環境負担を低減する材料開発に可能性を感じて。

子供の頃は体が弱く、家で百科事典を読んだり、入院中は主治医から借りた医学書を読んだりしていました。専門書を読むうちに、科学や研究者に興味を持つようになりました。絵を描くことも好きだったのですが、絵は趣味でも続けられると思い、研究者の道を選びました。学生時代は超分子化学分野の研究をしていたので、バイオマス材料や生分解性材料のことはほとんど知りませんでしたが、学位取得後に両材料を研究テーマとする仕事に出会い、環境負担を低減する材料開発に大きな可能性を感じ、取り組むこととなりました。今では、持続可能な社会の構築を目指した、バイオプラスチックの開発がライフワークになっています。

Q 研究者を続けていくために大切なことは何ですか?

A 縁があった分野を楽しみながら続けていくこと。

近隣の大学で働く妻と協力しながら兼業主夫として家事や子育てをしています。群馬県は周りの自然が豊かで遊ぶところも多く、子供がのびのびと成長できる環境だと思います。最近は趣味の絵を描くことを娘と一緒に楽しんでいます。絵を教えることよりも、私が絵を描くことに熱中し過ぎて娘にすねられてしまうこともあります。家族との時間と研究する時間の両方を楽しみながら研究しています。

趣味でも研究でもいろいろなことに関心を持つのは良いことです。しかし、関心の強い分野に進んだとしても、やりたいことができるとは限りません。私自身、入学した学科は興味があった分野とは違いました。でも、実験したり考察したりといった研究を楽しむ姿勢を持っていたからこそ、研究分野を変えながら今も研究をしています。研究は、最初に興味を持った分野だけではなく縁があった分野を楽しみながら続けていくことが大切だと思っています。