

JSTnews

未来をひらく科学技術

2022

10

October



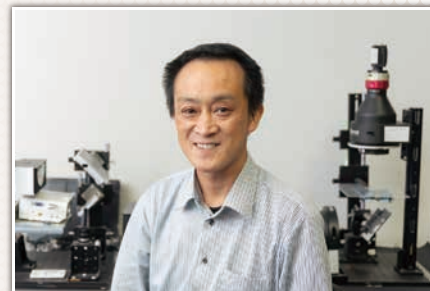
光の計測×情報処理
見えないものを捉える



100年に及ぶ植物の性の謎
解き明かし農業に生かす

03 — 特集1

光の計測×情報処理
見えないものを捉える



08 — 特集2

100年に及ぶ植物の性の謎
解き明かし農業に生かす



12 — 連載 どうやって実現する? 明るく豊かなゼロエミッション社会 第4回 2050年の電源構成シナリオ



14 — NEWS & TOPICS

◆サイエンスアゴラ2022&
イノベーション・ジャパン2022開催



16 — さきがける科学人

身近な疑問が研究の源
小さな発見を大きな課題に

広島大学 大学院医系科学研究科 助教
大黒 亜美



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

光の計測×情報処理 見えないものを捉える

向川 康博 Mukaigawa Yasuhiro

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 教授
2017年よりCREST研究代表者

特集 1

OVERVIEW ■

空間を飛び交う光線は角度、波長、時間などの高次元な視覚情報を含むが、通常のカメラでは平面画像しか撮影できない。これに対し、奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科の向川康博教授は、多様な軸で光を計測する光学的な工夫と情報処理技術を組み合わせることで、豊富な視覚情報を含む画像を得ることに成功した。撮影シーンの深い理解を可能にする見えないものを捉える技術は、産業への応用が期待されている。

光が持つ多様な情報 2次元画像では消失

1800年代に木箱型カメラが登場して以来、さまざまなレンズや材料を組み合わせて、カメラでより鮮明にシーンを切り取ろうと改良が重ねられてきた。近年では、小型化・高性能化が一層進み、誰でも手軽に美しい写真を撮れるようになってきている。「自動運転やAIによる画像診断など、至る所でカメラ画像が活用されていますが、画像に全ての情報を落とし込めているわけではありません」と指摘するのは、奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科の向川康博教授だ。

人もカメラも、レンズを通して入ってきた光の情報を処理することで「見る」ことができる。空間を飛び交う光には、通過位置や角度、波長、時刻、偏光状態などの情報が含まれており、反射や屈折、散乱などの光学現象を繰り返しながら人の目やカメラに届いている。つまり光は情報を運ぶ媒体といえる。

しかし、同じ光を受け取っていても人は瞬時に物体の材料や質感を判断できるのでに対し、AIなどが2次元画像からこうした情報を判別することは難しい。「これは2次元画像では、光が持

つ多角的な情報が失われているためです。しかし、もし必要な情報を的確に捉えることができるになれば、画像からより深くそのシーンを理解できるようになるはずだ」と語る。

自動運転であれば、霧や雨などの悪天候時でも、道路標識などの必要な情報を正確に抽出できれば、安全性は大きく向上するはずだ。あるいは、大掛かりな装置を使わず、病院ですぐに皮下の血管の様子を確認できれば、採血や診断に役立てられるに違いない。そこで、向川さんは「見たいものだけを見る」「見えないものを見る」といった特殊な撮影を可能にする技術を開発するために、CREST「多元光情報の符号化計測と高次元化処理の協調設計」を立ち上げた(図1)。

プロジェクトチームは4つに分かれており、向川さんの率いる計測グループでは多元光情報の計測や撮像過程を情報科学的にモデル化する。大阪大学大学院情報科学研究科の松下康之教授は、解析グループで高次元データ解析アルゴリズム設計とソフトウェア開発を担う。また、立命館大学情報理工学部の田中賢一郎准教授は、特定活用グループで多元光情報の学際活用と応用に合わせた最適化を、千葉大学大学院工学研究院の久保尋之准教授は、融合活用グルー

プで多元光情報の融合活用と最適な可視化を行う。

この4つのグループが互いに連携し、計測デバイスの光学設計と情報科学分野における計算アルゴリズムを融合し、両者を協調的に設計することで高次元光イメージングの実現を目指している。つまり、光学デバイスだけではなく、見えないものを見えるようにするための画像処理技術も併せて開発し、これまでにない画像を得ようとしているのだ。

トレンドは追わず 発想の転換で勝負

向川さんが目指す多元情報を含む画像もコンピューター上で処理するわけだが、画像の情報処理に関する研究の世界では、膨大な量の2次元画像を深層学習させる研究スタイルが主流になりつつある。コンピューターに学習させる画像を集めるのに以前は苦労していたが、近年インターネット経由でいくらかでも手に入るようになったことも大きな要因だ。今や画像処理の研究は、カメラ無しでも成り立つというから驚きだ。

これに対し「トレンドは追わない。発想の転換で世界の最先端に挑む」という標語を掲げる向川さんは、自分

たちで工夫した計測デバイスで情報量の多い画像を撮影することにこだわり続けている。「現在の深層学習のように情報量の少ない画像を素材としている限り、これまでの延長線上の成果しか得られないでしょう。私たちは画像の情報量を増やすことで、これまでにない全く新しい成果を打ち立てたいと考えています」と強調する。

プロジェクトでは、はじめに画像が含む情報の次元を大幅に上げるため、波長軸、視点位置軸、ナノ秒単位時間軸の3つの軸で光線を計測

図1 CRESTの実施体制



図2 光の透過と散乱を見分ける計測技術の開発



通常のカメラで撮影した画像(左)と透過光のみを用いて画像から再構成した画像(中央)と計測システム(右)。位相をずらしながら細かいチェッカーパターンをプロジェクターで投影しつつ撮影することで、透過光と散乱光を分離している。チェッカーパターンはコンピュータの画像処理から逆算するように設計している。

し、これまで利用されてこなかった潜在的な視覚情報を抽出する方針を立てた。しかし、高次元になるほど計測には時間とコストがかかる。また得られたデータのノイズも増え、膨大なデータ量に複雑な計算処理も必要だ。その上、計測デバイスの性能には物理的・光学的な限界もある。

そこで、向川さんらはカメラの撮影原理を根底から改め、計測デバイスの光学設計に情報科学分野の計算アルゴリズムを融合させた画像処理を前提とする撮影方法を設計した。

「特殊なカメラで撮影した情報を用いるコンピュータービジョン研究は少なく、計測と情報の掛け合わせによりオリジナリティーを高められるというメリットもありました」と狙いを説明する。

この考え方に基づく研究成果の1つが、濁った水の中にある物体の撮影だ。普通のカメラであれば、ぼんやりした画像しか得られないが、このシーンには光源から真っ直ぐ水中を透過する光と、散乱する光が存在する。水中の物体に当たった光が透過

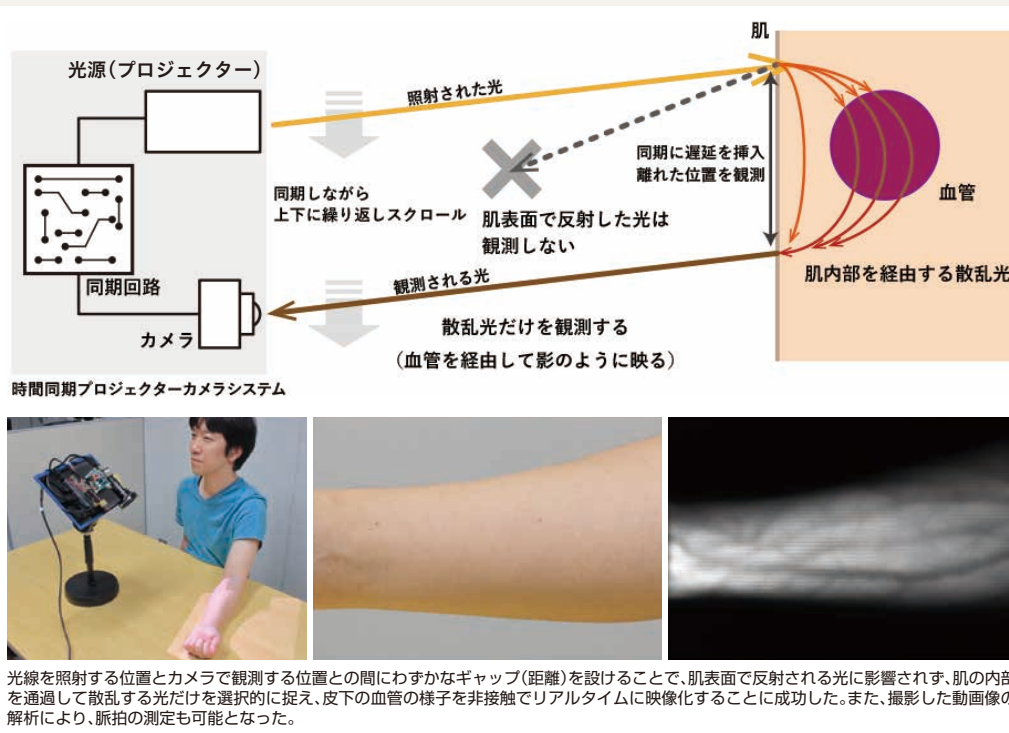
することはないため、真っ直ぐ透過する光だけを取り出すことができれば、物体が影となって現れるという仕掛けだ(図2)。もちろんそのようなことは物理的には不可能で、後でコンピューター上にその画像を再現できるように、逆算して計測方法を設計している。

皮下血管の可視化技術や非接触タッチパネルを開発

こうした光を分離して抽出する技術を使うことで、皮下

の血管も見られるようになる。光源から肌に光を照射すると光の大部分は肌の表面で反射するが、ごく一部は肌の内部に入り込んで散乱する。そのため、光が肌に当たった位置と内部で反射して外に出てくる位置との間には、わずかなギャップが生じる。向川さんらは肌の内部を経由する散乱光に着目し、その光を計測するためにレーザー走査型プロジェクターとローリングシャッター方式のカメラを並行に配置した装置を構築した(図3)。

図3 非接触・リアルタイムでの皮下血管の可視化



光線を照射する位置とカメラで観測する位置との間にわずかなギャップ(距離)を設けることで、肌表面で反射される光に影響されず、肌の内部を通過して散乱する光だけを選択的に捉え、皮下の血管の様子を非接触でリアルタイムに映像化することに成功した。また、撮影した動画の解析により、脈拍の測定も可能となった。

具体的には、光線の照射と撮影のタイミングに、意図的に1ミリ秒以下のわずかな遅延時間を挿入することで光線の照射位置とカメラで撮影される位置をずらし、肌の表面で反射する光ではなく、肌の内部を通過して散乱する光だけを選択的に捉えるという。また、外光の影響を受けにくいので日常的な明るさの室内でも利用でき、X線と異なり健康への影響も少ない。「非接触かつリアルタイムで皮下の血管が見られるので、血管が細い高齢者や子どもへの採血や注射、あるいは血管の形態が変化する疾患の診断などにも応用できると考えています」と語る。

表面より少し奥に入った光を捉えられるなら、表面より少し手前の光を

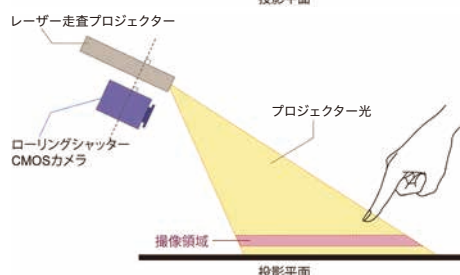
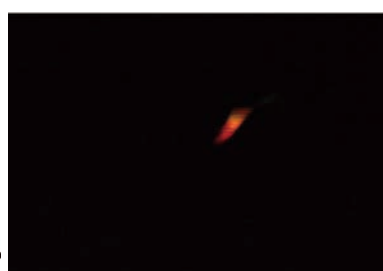
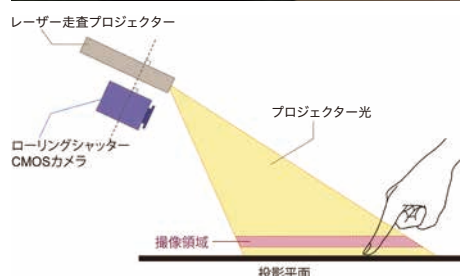
計測したら何ができるだろう。その発想から生まれたのが、プロジェクターから投影した画面を指先でタイムラグ無く操作できるタッチセンシング技術だ(図4)。従来は、プロジェクターが投影した映像全体を別のカメラで撮影し、指先の位置を検出していた。しかし、この方法では指先の位置をピンポイントで検知するのが難しくだけでなく、投影した映像自体に手が映っていると、ユーザーの手と見分けられない、画像処理に時間がかかるなどの問題があった。

そこで向川さんらは、コンピューター処理を行うことを前提に、プロジェクターとローリングシャッター方式のカメラを組み合わせた装置を作成。カメラでの撮影はファインダー

に収まる範囲全体ではなく、指で触れたかどうかの判定に必要な平面に対して少し上の空間、すなわち平面と平行方向の数センチメートルの厚みの範囲だけに限定した。指が面に触れたときは指の一部が撮影され、触れないときは撮影されない仕組みである。

これにより指が画面に触れているかどうかを1台のカメラから判定できるようになった。また指先の有無を検知するだけなので処理にかかる時間が圧倒的に短くなり、スマートフォンを操作する時のような快適な操作性が実現した。「この研究はタッチセンシングする領域をコントロールできるので、タッチレス操作への応用も可能です。非接触での操作ができるようになれば、感染症対策にも有効でしょう」と、向川さんは期待を込める。

図4 投影画面を指先で操作するタッチセンシング技術



タッチセンシングする領域を限定することで、非接触でのタッチ操作を実現した。右はローリングシャッター方式カメラの撮影画像。タッチしている(操作が判定される)時は指の一部が撮影される。

世界遺産のステンドグラス 分光撮影でアーカイブ化

プロジェクトでは、計測デバイスの設計と情報処理を各チームが密接に連携しながら進めることで、大きな成果につなげてきた。特にプロジェクト発足時には、CRESTの理念を大切にしたいと考え、メンバーと頻繁にミーティングを行ったほか、学生も含めたディスカッションや合宿などを実施し、お互いに考え方を共有することに重きを置いてきた。

ところが、新型コロナウイルス感染症により研究は一時中断し、ミーティングの回数も激減してしまった。はた目には大変な状況にも見えるが、向川さんはこの逆風が新しい展開をもたらしたと振り返る。「多少お互いの距離ができたことで、メンバーそれぞれが新しいアイデアを生み出し、試していったのです。理念は共有できていたので、新しい方向性を自由に展開してもらいました」。

当初の波長軸、視点位置軸、ナノ秒単位時間軸の3軸に新たに加えられたのは、ピコ秒単位の時間軸、被写体に対する照明角度、遠赤外帯域の波長、照

図5 アミアン大聖堂のステンドグラスの分光撮像



明と観測の走査の時間差の4軸だ。これらを単独で、あるいは融合して用いることで応用範囲はさらに広がった。

その成果の1つが、フランスが進める建築遺産の高精度なデジタルアーカイブ化事業の一環で行った世界遺産「アミアン大聖堂」のデジタルアーカイブ化だ。仏ピカルディ・ジュール・ヴェルヌ大学との共同研究によるもので、建築の形状をピカルディ・ジュール・ヴェルヌ大学が、ステンドグラスを向川さんがそれぞれ担当した。

この撮像に用いられたのは、高分解能分光計と回転ミラーシステムで構成される計測システムだ。400～2500ナノ(ナノは10億分の1)メートルの範囲で、1ナノメートル以下の分解能で高精細な分光撮像ができる。しかし、画像の1画素ずつを走査線として画面の上から順にスキャンしていく方式であるため、画像全体の計測には数時間かかってしまう。そのため、時々刻々と天気や太陽高度が変化する環境で外光を透過するステンドグラスの色彩を正しく計測することは困難だ。

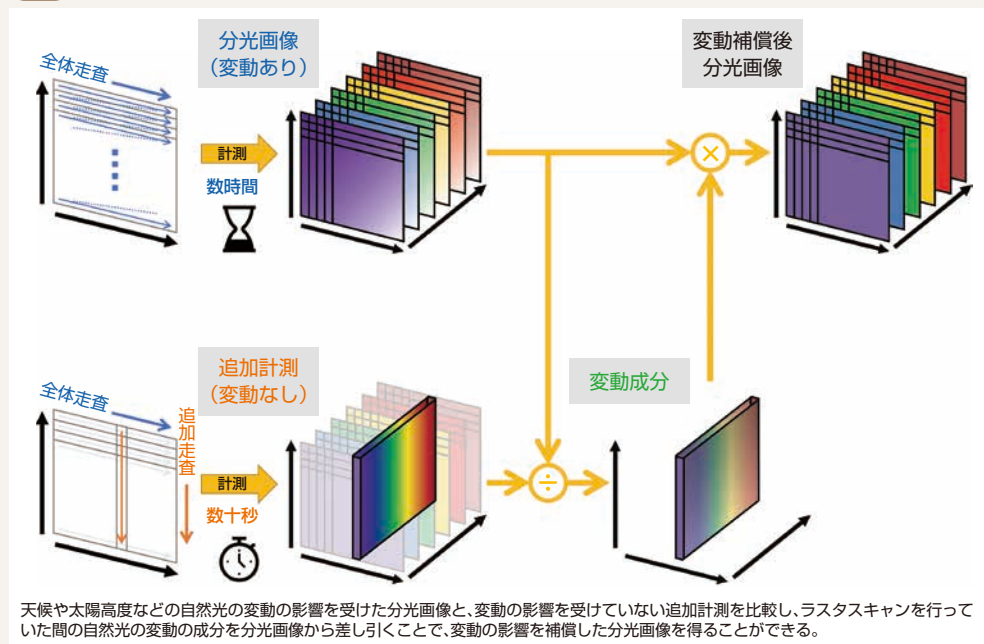
そこで、向川さんは上から順に走査していく途中で、走査線と垂直方向に1列

だけ追加してスキャンを行った。「これで変動の影響を受けた分光画像と、受けていない追加計測で、二重に画像を得ることができます。それら2つを比較すると自然光による変動成分が得られるので、この成分を変動した分光画像から差し引くことにより、変動の影響を校正した画像が得られました」と向川さんは成果の要因を語る。さらに、この手法で得られた高次元のデータを短時間で解析する方法も開発。外光の変化に影響されない色彩のステンドグラスのデジタルデータ化が実現した(図5、6)。

多元光計測研究は、食品から自動車、医療、文化財まで、あらゆる分野への応用が考えられるが、奈良県出身で文化財をずっと身近に感じてきた向川さんは、今後、特にこのような文化財分野での応用を進めていきたいという。すでに研究室では、古文書の裏写りを消して文字を読みやすくするなどの実績もある。「世界遺産のデジタルアーカイブ化の実績を足がかりに、いつかキトラ古墳の壁画をはじめとした奈良の文化財も手掛けたいですね」と思いをはせた。

(TEXT: 桜井裕子, PHOTO: 石原秀樹)

図6 自然光の変動を補償した分光画像の取得





特集2

OVERVIEW ■

植物の性は、雄しべと雌しべが共存する両性花を祖先に、雌・雄へと性別を分離して進化してきた。一方、栽培柿では一本の木の中に雄花・雌花の両者を着生し、まれに雄花から両性花へ先祖返りすることも知られている。性の揺らぎはなぜ起きるのか。岡山大学環境生命科学学域の赤木剛士研究教授は、果物の柿を通じて100年近く謎とされてきた植物の揺らぐ性の仕組みを明らかにした。そのメカニズムは、農業にとって重要な「作物の性別」を自由に制御できる技術への応用が期待されている。

100年に及ぶ植物の性の謎 解き明かし農業に生かす

赤木 剛士 Akagi Takashi

岡山大学 環境生命科学学域 研究教授
2020年よりさきがけ研究代表者

農学と生物情報学の融合 植物で初の遺伝子を発見

動植物は遺伝的な多様性を維持する仕組みとして「性」を持っている。動物は普通、1つの個体に雄雌どちらかの性を持つが、植物の性は、雄雌が共存する両性花のみを付ける両全性を祖先に、雄花だけを付ける雄木、雌花だけを付ける雌木に分離する雌雄異株として進化してきた。さらに、1つの木に雄花と雌花の両方が付く雌雄異花同株も混在するなど、多様な性を表現する。植物でなぜ、このよ

うに多様な性が表現されるのかは長年の謎であった。

植物の性に関する研究は1900年代初頭から始まった。植物の性も動物と同様に、性染色体で制御されていることが明らかとなり、さまざまな植物で性染色体が同定された。しかし、性決定の仕組みに関わる性決定遺伝子は100年近くわからず、植物の性を制御するメカニズムも仮説の域を出ないままだった。

植物で初めてとなる性決定遺伝子が発見されたのは、2014年のことである。OGI(雄木)、MeGI(雌木)と

命名された性決定遺伝子を発見したのは、当時京都大学で園芸学を専攻していた岡山大学環境生命科学学域の赤木剛士研究教授である。赤木さんは、海外特別研究員として渡った米カルフォルニア大学デービス校でバイオインフォマティクスの研究を進め、雌雄異株性のマメガキで性決定遺伝子を発見した。

カキ属はこれまでゲノム情報の蓄積が全くなく、遺伝地図も整備されていなかった。そこで、次世代シーケンサーと呼ばれるゲノム配列解析技術を使い、さまざまな観

点から解析し、性決定遺伝子のOGI、MeGIの発見に至った。同時に、Y染色体上の非翻訳small-RNAであるOGIが、MeGIによる雌化を食い止めることで、雄化を誘導するという、性決定のメカニズムを明らかにした(図1)。

「当時、植物の性決定遺伝子が発見されていないことは知りませんでした」と語る赤木さん。柿の多様な性の表現が栽培や育種などが農業上の問題だったことから、留学先での研究テーマに選んだという。「農学とバイオインフォマティクスを融合させることで、それまで見えてこなかったものが見えてくるのではないかと思います」と振り返る。

キウイの両性花を開発 自家受粉で生産性が向上

帰国後、京都大学で植物の性決定に関する研究を続けた赤木さんは、さきがけ「カキ属をモデルとした環境応答性の性表現多様化機構の解明」(15~18年度)に応募し、植物の性に関する研究をスタートした。キウイフルーツにおける2つの性決定

遺伝子「Shy Girl」
と「Friendly Boy」
の発見と、植物が性別を手に入れる進化の仕組みの解明も、研究テーマの1つである。

赤木さんは、これら2つの遺伝子が性別獲得の進化にどう関わるのかを遺伝情報学の観点から解析した。そして、もともと両全性だった個体から、Friendly Boy遺伝子を失ったものがX染色体となり、Shy Girl遺伝子を新しく獲得したものがY染色体となること、またその組み合わせにより、性別が決まることを解明した(図2)。

この発見は、1978年に提唱された二因子説という仮説を証明することにもなった。二因子説は、植物の性が両全性から性別を獲得する進化の過

図1 カキ属におけるOGI遺伝子(MeGI遺伝子系)による性決定の機構

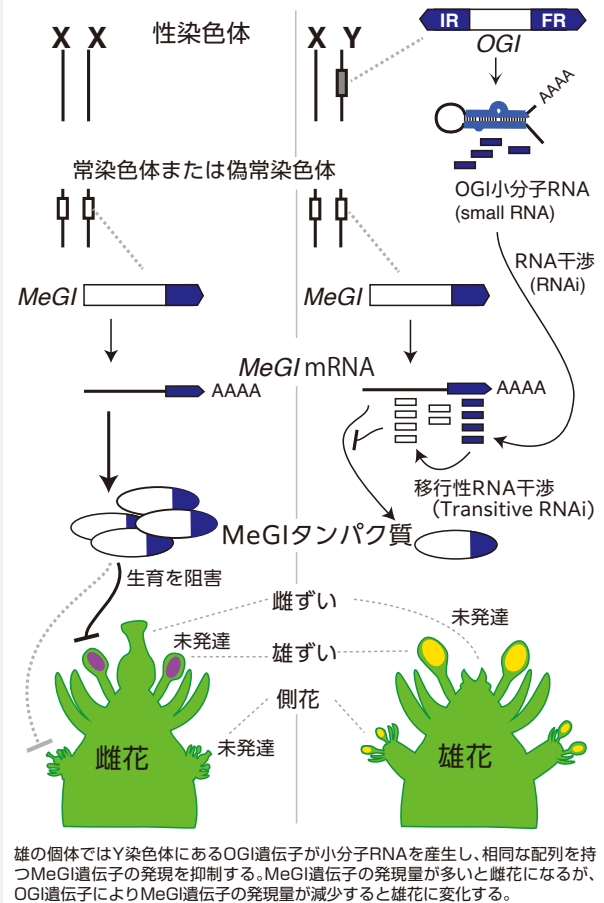
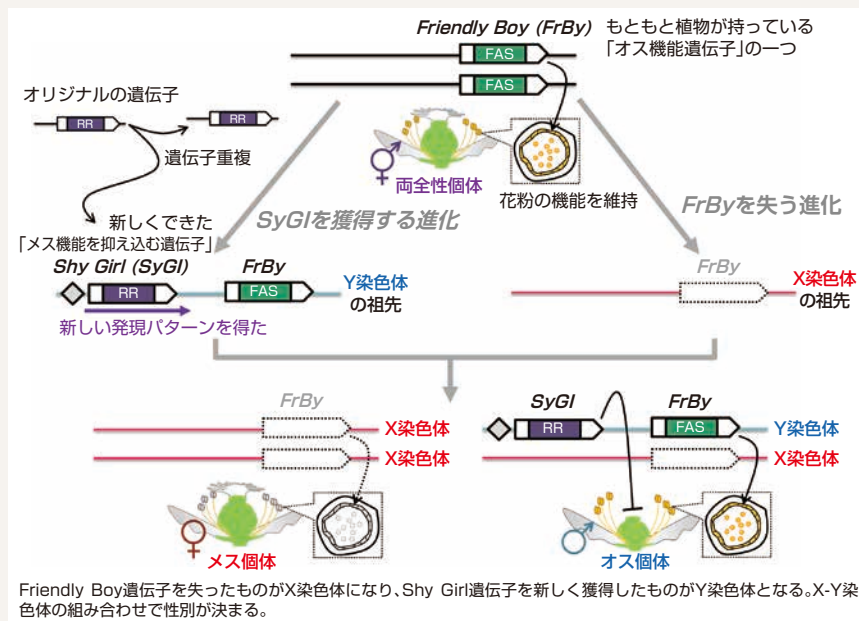


図2 キウイにおける性別獲得の進化



程は、まず雄を維持する遺伝子の変異により、X染色体ができる。さらに雌化を抑制する遺伝子が新規に誕生して、Y染色体が成立し、その結果、性別ができるというものである。Shy Girl遺伝子とFriendly Boy遺伝子の機能を明らかにするために、花に雌しべが無い雄木のShy Girl遺伝子を遺伝子編集で変異させ、雄の花粉がなくては果実を作らない雌木にFriendly Boy遺伝子を導入した。その結果、いずれも自家受粉により果実を付ける両性花を作することに成功した。

この成果は、農業界にも大きなインパクトを与えている。それまでキウイは雌雄それぞれの個体があり、受粉に必要な雄を雌の開花時期に合わせて育てなければならず生産性に影響を与えていた。しかし、性決定遺伝子のゲノム編集により、両性花のキウイが作られるようになったため、収穫率が向上したのだ。

ところで、植物の研究をするためには、実際にその植物を育てなければならぬ。しかし、通常の栽培種を一から育てると実が付くまでに時間がかかる。キウイも例に漏れず、結実まで6年近くを要するのが通常であった。そこで、Shy Girl・Friendly Boy遺伝子の研究では、ニュージーランドの共同研究者とともに、半年くらいで実がなる早咲きのキウイをゲノム編集により作ることから始めたという(図3)。

大量絶滅期にゲノム倍化生き残りをかけた進化

植物の進化の中で、性決定遺伝子がどのように誕生したのかを解き明かすために、赤木さんらはマメガキで柿の全ゲノム解読を行った。そして、進化の過程で全ゲノム倍化を経験している痕跡を発見した(図4)。ゲノム倍化とは、遺伝子情報のワンセットであるゲノムが倍に増える現象である。全ゲノム倍化が起きた時期は約6000~7000万年前、地球に隕石が衝突した最終大量絶滅期と一致していることもわかった。つまり、柿の性決定遺伝子OGI、MeGIによる性別の分離は、ゲノム倍化により、カキ属で特異的に獲得された性質であることが解明されたのである。

「ゲノム倍化は特別なことではなく、常に非常に低い頻度で起きています。いわゆる突然変異です。ですの

で、大量絶滅期にゲノム倍化が一斉に起きたというより、隕石が落ちて普通なら生きられない環境で、ゲノム倍化した個体がたまたま生き残ったということです。ゲノム倍化や遺伝子倍化はその後繰り返されて、そのたびに進化に関わる大きなイベントが起きているのではないかと、そこが研究テーマとして興味深いところです」と赤木さんは語る。

1つの木に混在する雄花と雌花植物の性の「揺らぎ」を解明

次に赤木さんらが研究を進めたのは、植物の性の揺らぎの解明だ。私たちが普段食べている栽培柿は、1つの木に雄花、雌花が混在しているが、まれに両性花が着くことがある。先祖返りにも見える植物の性の揺らぎはなぜ起こるのか。実は、性決定遺伝子が発見されたマメガキはヒトと同じ染色体が対になった二倍体の野生種で、雄木と雌木に分かれている。一方、栽培柿は六倍体で、一本の木に雄花と雌花が付く。六倍体の木に雌花と雄花が同時に着く仕組みは「エピソード」と呼ばれるDNAに書き込まれた記憶が制御していることを赤木さんらは

既に解明していた。

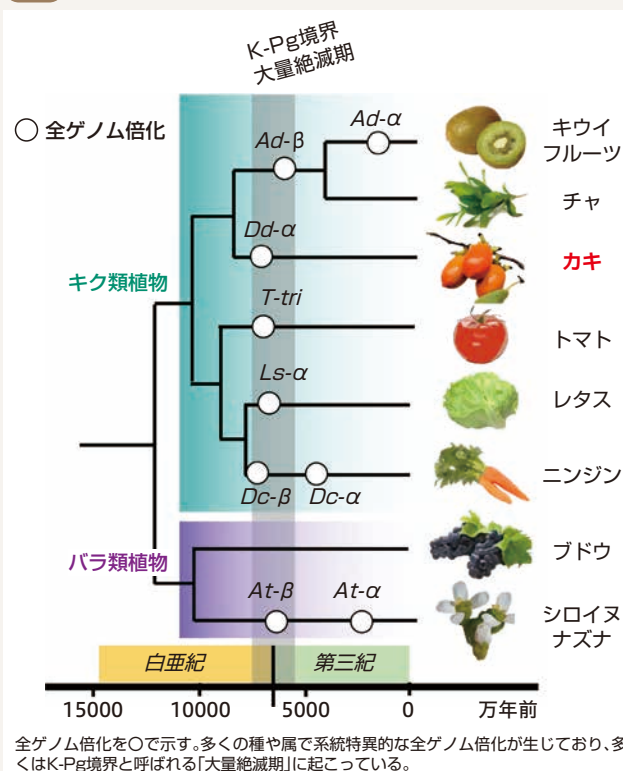
では、雄雌が混在する柿の木に、両性花が付くのはなぜなのか。赤木さんらは、遺伝子共発現ネットワーク解析という遺伝情報学の解析手法を用いて、両性花へ変化を促す働きを持つ新しい遺伝子「DkRAD」を発見した。DkRAD遺伝子は、サイトカイニンやアブシジン酸などの植物ホルモンに働きかけて、雄しべに雌しべを形成させ、両性花へと変化させる働きを持つことがわかった(図5、6)。もともと花弁の形に関わる遺伝子として知られ、性別の変化に関わる機能は、柿のみで発見された新しい働きである。

また、DkRAD遺伝子を介した両性花への変化は六倍体の栽培柿のみで起こる現象で、野生種の二倍体の柿では見られない。「以前から、ゲノム倍化が起こると性ができたり、逆に戻ったりするということ言われてきました。DkRAD遺伝子によって両性花が出来る仕組みは、一見、先祖戻りのようにも見えますが、実際には両性花から性が生まれて、また新しい進化を経て、両性花に変わったと考えられま

図3 研究室で栽培中の早咲きキウイ



図4 植物における進化過程での全ゲノム倍化



す」と説明する。研究テーマに掲げたように、進化によって植物の性は揺らぐということを見事に示した形だ。

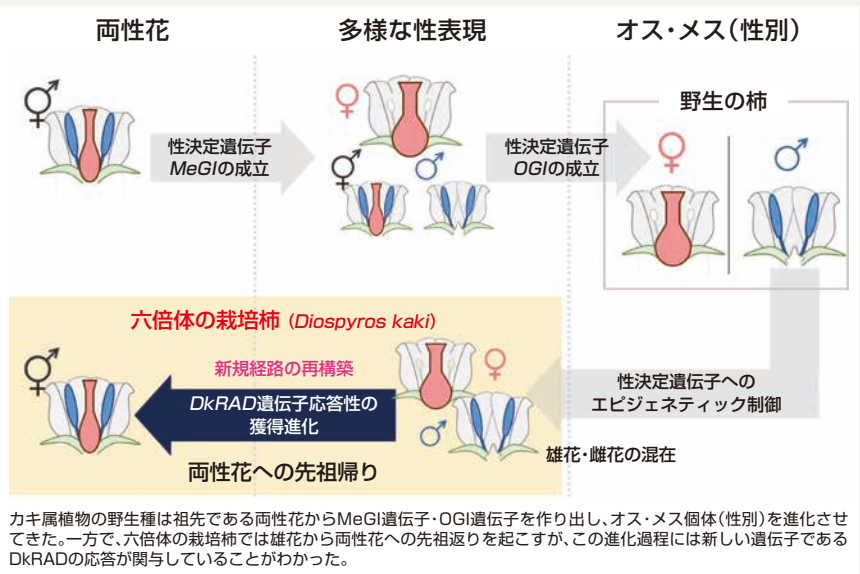
アドバイザーの一言が後押し 研究に「説明可能なAI」導入

植物の性の進化をテーマにさきがけ研究を進めてきた赤木さんだが、平行して農学とAIを融合させた研究にも取り組んできた。AI技術である深層学習を取り入れることで、トマトの全ゲノム情報をAIで解析し果実が熟れる際の遺伝子発現を予測する技術の開発に成功した(図7)。また、柿果実の内部障害を見抜く技術の開発は県の試験場やメーカーと提携して、社会実装が進められている(図8)。

研究にAIを取り入れるきっかけとなったのは、さきがけ研究のアドバイザーだった九州大学大学院システム情報科学研究院の内田誠一教授との出会いが大きいという。アメリカでゲノム情報を扱う研究室で研究に取り組んでいたときから、農学と情報学にAIを取り入れたいと考えていたが、「当時のAIは判断の過程がブラックボックス化していたため、躊躇していました。内田先生と出会い、説明可能なAIがあることを知り、一緒に研究をさせて頂くことになりました」と語る。

周囲からは「せっかく植物の性決定で成功しているのに、なぜAIをやるんだ」と言われることもあったが、失敗を怖れてはブレイクスルーを起

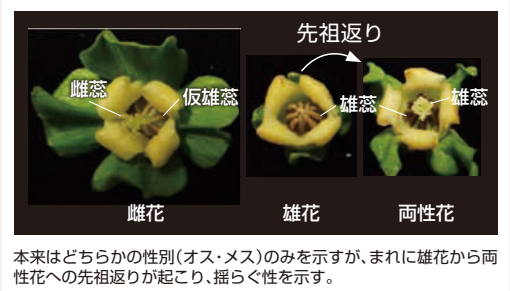
図5 柿の遺伝子進化による「植物の揺らぐ性別」の成立過程



こせない。「日本には過去の方法に積み重ねていくだけで、新しいことには、人が手を出すまでなかなか手を出さない人も多いように思います。しかし、今の情報学は更新スピードがとても早いので、手をこまねいていると手遅れになりかねません」と赤木さんは危惧する。

これまでの植物の性の進化に関わる研究により、植物は進化の過程でゲノム倍化、遺伝子倍化を繰り返して、それぞれの植物に独自の形質を作ってきたことがわかった。しかし、倍化によって新しい形質を駆動する新機能分子の大部分は未開拓のままである。そこで、赤木さんは、さきがけ

図6 栽培柿における両性花への先祖返り



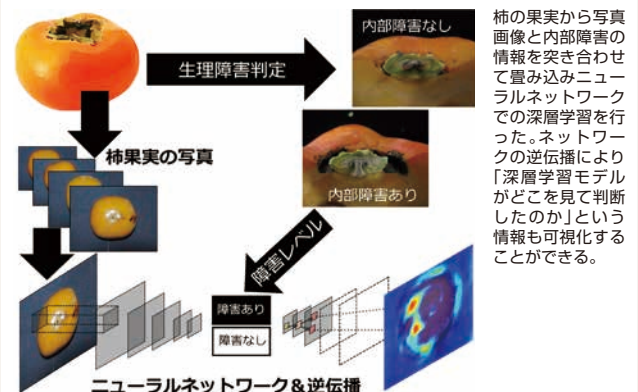
の新たなテーマとして、ツツジ目果樹作物やトマトの進化に着目し、ゲノム倍化、遺伝子倍化により系統特異的に駆動する新規機能分子の探索する研究を進めている。さまざまな新機能分子の発見が、今後の農業の発展にも大きく貢献することだろう。

(TEXT:伊藤左知子, PHOTO:伊藤彰浩)

図7 温室で栽培中のモデル植物トマト「マイクロトム」



図8 深層学習による柿果実の内部障害予測モデルの構築



どうやって
実現する？

明るく豊かな ゼロエミッション 社会

連載
【第4回】

井上 智弘 Inoue Toshihiro

エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部
主管研究員 / 低炭素社会戦略センター 客員研究員

古木 真 Furuki Makoto

低炭素社会戦略センター 研究員

2050年の 電源構成シナリオ



若手商社員・皆川豊を主人公としたストーリー仕立てで、低炭素社会戦略センター(LCS)が発行する提案書を読み解く連載の第4回。前回、LCSの岩崎博特任研究員と河原崎里子研究員にバイオマスエネルギーの可能性と課題について学んだ皆川。今回はLCSでゼロカーボン達成のための電源構成シナリオについて研究している井上智弘客員研究員、古木真研究員に「明るく豊かなゼロエミッション社会」実現の見通しについて話を聞いた。

ゼロカーボンで無理のない将来 多元方程式から最適解を導く

皆川: 今日ではよろしくお願いします。さて、近頃は行政だけではなく民間事業を通じて地球規模課題に取り組む潮流が来ています。わが社も脱炭素事業に投資したいのですが、カーボンニュートラル達成への懐疑論や、生活・ビジネスの圧迫を危惧する声が社内でも根強く、まだ踏み込めていません。そこで、ゼロカーボンかつ経済的にも無理のない将来像を研究されているお二人に話を伺いに来ました。

井上: なるほど。よくいただく意見ですが、最初から否定的に考えず、技術進展によるコスト低減を含めれば、実現可能性のある社会像を描くことはできます。

古木: 具体的には、私たちの研究成果をまとめた表を見てください(表1)。上にある年、二酸化炭素(CO₂)削減率、電力需要の3つをあらかじめ設定し、それぞれの条件で最も経済合理的な電源と調整技術の配分を計算しました。すると、電力需要が現在の水準の2倍程度の範囲ならば、2050年におけるCO₂削減率が100パーセントでも、おおむね現在水準程度の発電コストを維持できる解があることがわかりました。

皆川: 将来的に脱炭素を達成しても、家計やビジネスの負担が極端に増えない未来もあり得るんですね。でも変数が多く、都合の良い数字を出したようにも見えてしまいます。

古木: では、かいつまんで説明してい

きましょう。まず技術チームが調査・検討して将来の技術達成度を反映したシナリオを構築します。次に、太陽光などの発電から送電、消費に至るまでの電力システム全体を、このシナリオを前提条件として多くの変数から構成されるモデルとして構築します。条件としては、一部の構成の利用をゼロにしたり上限を設けたりします。そして最後にこれを使った多元方程式からコストが最小となる解を導いています。

計算そのものには私たちの意思は入っていませんから、誰が計算しても同じ答えが出るはず。それに、電力需要も現在示されている政府見通しより大きな値でも計算しています。それでもケース2や3のように、50年にはCO₂削減率100パーセントを達成できるという結果も得られています。

未来の技術達成度を予測 目標達成に向けて開発を

皆川: 未来の技術達成度は、開発中の技術がその頃に達成されているのを見越しているということでしょうか。

井上: 少し違います。エネルギー関連の技術は日進月歩で、再エネの発電効率や、空調をはじめとした電力の消費効率は向上し続けています。そこで私たちは物理法則の制約まで立ち返って、必要とされる実現可能な技術進捗を検討し、未来の

技術達成度を予測しています。

脱炭素社会実現のための見通しは政府なども発表していますが、LCSシナリオのユニークな点は、将来的に達成され得る技術を前提とした、科学的根拠に基づくさまざまな技術シナリオを提示している点です。例えば他機関の見通しに比べ、蓄電容量が非常に大きいのもそのためです。

皆川: よく見ると、ケース3では電力需要が大幅に増えていますね。省エネ技術の発展、さらに日本では人口減少が見込まれるのに、なぜこのシナリオを考えたのですか。

古木: 1つはAIをはじめとするIT技術において日本が競争力を維持するためには、これまで以上に電力を必要とするからです。もう1つはより本質的で、ゼロカーボンを達成するため

表1 2030年および2050年の電源構成例

ケース		1	2	3
年		2030	2050	2050
CO ₂ 削減率(%)		70	100	100
年間電力需要(TWh)		1,200	1,200	2,000
発電量 (TWh)	原子力	0	0	0
	石炭	0	0	0
	LNG	383	0	0
	水力	130	140	140
	太陽光	703	745	1,000
	陸上風力	100	400	400
	洋上風力	0	0	837
	地熱	12	112	112
	バイオマス	10	31	31
	合計	1,337	1,428	2,520
利用量 (TWh)	蓄電池	307	294	234
	揚水	1	126	321
	水素	0	8	32
蓄電池容量(GWh-ST)		1,219	1,126	1,161
発電コスト(円/kWh)		12.1	13.9	16.7

出典:ゼロカーボン電源システムの安定化と技術・経済性評価(Vol.3)
—2030年政府案実現の見通し評価と2050年ゼロカーボン電源化への課題—
(fy2021-pp-05 表3より抜粋)

には、最終的に航空機など難しい領域は除いて、かなりのエネルギーを電化せざるを得ないからです。

皆川：主に化石燃料を使っていた暖房、給湯などもゼロカーボン化しようとするれば、必然的に電化することになる。つまり「電力以外」としてカウントされてきたエネルギー需要の多くが「電力」に組み込まれるんですね。

井上：バイオマスや、水素・アンモニアなどの電力以外のエネルギーキャリアも期待されていますが、電化率を高める必要があるのは確かです。

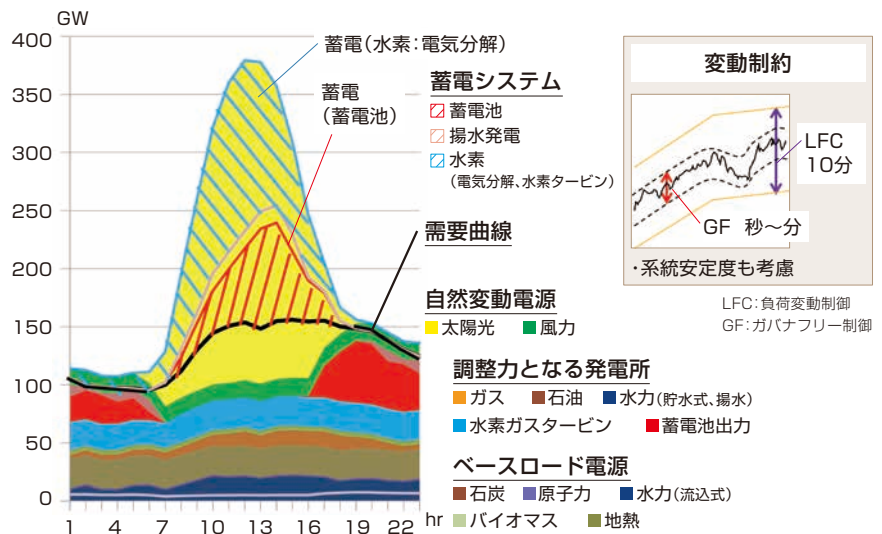
季節、時間帯で変動する使用量 地域間連系統、蓄電池を活用

皆川：なるほど。計画的に投資を進め、このシナリオ通りの電源構成を達成できれば、日本の未来は明るそうですね。

井上：そう言いたいところですが、電源構成だけでは一般化した説明はできません。まず、電力システムには同じ時間帯で発電量と消費量が等しくなければならないという前提があります。このバランスが大きく崩れると、大規模な停電が起きてしまいます。ですが、再生可能エネルギーの本命である太陽光と風力は、発電量が天気任せ、風任せです。

一方で電力需要も時間帯や季節、天候によって大きく変動します。気まぐれな発電量と変動する電力需要のバランスを取らなければなりません。また、これまでの交流電力システムを支えていた火力発電などを減らし、太陽光や風力を主力電源化すると電力システムが不安定になり、大

図1 1日の電力需要と発電量(2050年CO₂排出量80%削減 夏季平日の時間出力の例)



出典：低炭素電源システムの安定化と技術・経済性評価
—2050年CO₂排出量80%削減に向けた日本の電源システムの課題— (fy2016-pp-10 図4)

規模停電のリスクが増大することが懸念されています(図1)。

皆川：発電量の合計が足りているだけでは不十分で、さらに発電量を自在に調整していた火力発電をゼロに近づけなくてはならないとなると、難題ですね。

古木：そこでカギになるのが送電です。日本中に散らばった気まぐれな電力源を総動員して、余っている場所から足りない場所に融通する必要があります。再エネは北海道、東北、九州などの大規模な電力消費地から離れたところに資源が偏在しています。古くから送電網は大手電力会社(旧一般電力事業者)の供給エリアごとに管轄され、エリアをまたぐ地域間連系統により融通してきました。再エネ大規模導入のために、私たちはさらに大規模な増強が必要だと考えています。

皆川：そしてもう1つのカギが蓄電技

術というわけですね。

古木：電力を地理的に融通する技術が送電網だとすれば、時間的に融通する技術が蓄電です。再エネ発電所ではしばしば発生する過剰な電力を一時的にストックし、不足したときに流すことで電力供給を安定化できます。電力価格が高いときに放電することになりますから、ビジネス的に成立するモデルも描き得ると思います。具体的に実用化が進んでいる技術としては、揚水発電、鉛およびリチウムイオン蓄電池、電気分解水素があげられます。新しい揚水発電については、LCSの浅田龍造主任研究員が詳しいですよ。

皆川：本日は電源構成や未来像について、お話しいただきありがとうございました。

一なお、物語は取材を元にしたフィクションである。

(TEXT・PHOTO: 福井智一)



低炭素社会戦略センター
森 俊介 研究統括／上席研究員

電力の効率的な設備と運用の在り方を探ることは、古くからの数理計画分野のテーマでした。電力は現代そして将来の炭素中立化社会の主力と期待されています。需給とも次々と新しい技術の開発が進むので、各所で検討が続けられています。最近では電力供給不足やウクライナ問題なども起こり、短期の需給と長期の炭素中立化をどのようにマッチさせるか、ますます研究が必要な分野となっています。



東京大学 大学院工学系研究科 原子力国際専攻
藤井 康正 教授

太陽光や風力という自然変動電源の電力系統への大量導入にはさまざまな課題がありますが、システム工学的手法を用いて、ここで示されているような経済性評価を深めることは重要でしょう。電力負荷を大きく超える膨大な余剰電力の経済合理的な活用策を定量的に示すことは、大きな不確実性を伴いますが特に重要です。そして政策提言のためには、原子力、CO₂回収・貯留(CCS)付き火力、輸入水素などの全ての選択肢を考慮した包括的な議論もとても重要です。

ワンポイントアドバイス

11月に3年ぶりの実地開催

対話重視のサイエンスアゴラ 10月はオンラインも

オンラインのメリットを享受しながら対話・体験の場を提供

17回目の開催となる2022年は、10月2日、10月20日～22日にオンラインで約30企画を実施し、11月4日～6日は実地開催でブースとセッション合わせて100を超える企画を実施します。

実地開催初日には、今年のサイエンスアゴラの全体像やおすすめの企画などを紹介するトークセッションを予定していますので、参加する企画に迷ったら、ぜひこちらのセッションを参考にしてください。

11月4日(金)12:30-14:00 サイエンスアゴラ2022見どころ紹介 (主催:JSTサイエンスアゴラ事務局)

なお、会場1階のメインステージ「アゴラステージ」で実施するこのセッションはライブ配信も行います。

サイエンスアゴラ2022のテーマは「まぜて、こえて、つくりだそう」

「サイエンスアゴラ」は、科学と社会をつなぐ日本最大級のオープンフォーラムです。市民、研究者、専門家、メディア、産業界、政策決定者といったあらゆる立場の人たちが対話、協働し、それを政策形成や知識創造へ結びつける「共創」のプラットフォーム構築を推進しています。

私たちの環境は、目まぐるしく変化しています。当たり前だったことが普通でなくなる場面が数多くあります。あらゆる物事はつながっていて、遠い国の問題が私たちの生活に直接的な影響を与えることもあります。発展する科学技術だけで人々の不便を乗り越えられる時期は過ぎ、今は斬新なアイデアが価値を生む時代と言われます。誰もが暮らしやすい未来に必要なのは、自分だけでは気づけなかった多様な問題意識や考え方です。いろいろな立場の人の声には、これからの社会をつくるヒントが潜んでいます。

サイエンスアゴラ2022のテーマは「まぜて、こえて、つくりだそう」です。未来の科学技術は、どんなものだと思いますか？誰を助けるものでしょうか？実現するには、どんな問題を乗り越えないといけないでしょうか？今年のサイエンスアゴラは、あなたの考えを聞くところから始めたい。集まった人々の知恵をまぜて、今ある枠組みや思い込みをこえて、未来像をつくる取り組みにご期待ください。



◆開催概要

サイエンスアゴラオンライン

日 時：10月2日(日)・20日(木)～22日(土)

※10月2日は1企画のみ

開催形態：オンライン開催

(ライブ配信。実施後にオンデマンド配信に切り替わる企画があります)

サイエンスアゴラ実地開催

日 時：11月4日(金)～6日(日)

会 場：テレコムセンタービル(東京 台場)

開催形態：実地開催(一部企画はオンラインとのハイブリッド開催)



※オンライン視聴および実地開催へのご来場にあたっては特設サイトから事前登録をお願いします。

特設サイト：

<https://www.jst.go.jp/sis/scienceagora/2022>

参加費：

無料(一部、材料費など実費がかかる企画があります)

主催：

JST

◆注目企画

サイエンスアゴラオンライン

10月2日(日)	13:00-14:30	サイエンスとアートの出会い～未来を創る君たちへ～(主催: JST理数学習推進部ジュニアドクター育成塾事務局)
10月20日(木)	14:30-16:00	対話の「場」を科学する一参加型「対話ガイドライン」(主催: 日本科学振興協会・社会連携ワーキンググループ)
	19:00-20:30	隣り合う未来～市民と科学者の垣根を越えて～(主催: 法学×科学 Vtuberチーム もん☆ばるなす)
10月22日(土)	19:00-20:30	分子で世界を変える！みんなで作る未来の研究テーマ(主催: 名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所)

サイエンスアゴラ実地開催(ブース)

11月5日(土)～ 11月6日(日)	ドクター・ナダレンジャーの楽しく学ぶこわい災害(主催: 防災科学技術研究所 おもしろ科学実験同好会)
	「つくる」から「科学」を考える(主催: うたたね)
	電子ホテルでシンクロしよう！(主催: 松江高専 電気情報工学科)

サイエンスアゴラ実地開催(ステージ企画)

	14:30-16:00	モバイル顕微鏡でミクロ世界からSDGsに取り組もう(主催: ライフ・イズ・スモールプロジェクト)
11月5日(土)	14:30-16:00	皆で紡ぐ！未来のブラックホール研究(主催: ACADEMIJAN(CoSTEP16期有志の会))
	16:30-18:00	ラジオ理系の森 特別編 サイエンスアゴラの星(主催: 理系の森ラジオ制作チーム)
	16:30-18:00	研究者大喜利 ～漫画の世界を一緒に実現するぞ！編～(主催: Arclev × AASN × CIC Tokyo)
11月6日(日)	16:30-18:00	映画「イヴの時間」から考えるロボットと人間の今とこれから(主催: LeaL)

過去最多の技術シーズ435件を紹介

展示やセミナー、マッチング機能も充実

国内最大規模を誇る産学連携マッチングイベント「イノベーション・ジャパン」を10月4日から10月31日まで、新型コロナウイルス感染症の拡大状況を考慮し今年もオンライン開催します。公式サイトでは日本全国にある123の大学などから、出願中を含め過去最多となる435件の特許取得済みの技術シーズを紹介するほか、出展研究者によるプレゼン動画などのさまざまなコンテンツを配信します。

今年はNEDO「ビジネスマッチング」との合同開催となります。JST・NEDO連携企画として「国立の研究機関による技術支援」参画機関展示や「スタートアップ支援機関連携協定(Plus)」参画機関展示を行い、各機関の多岐にわたる活動を紹介します。また、「大学発ベンチャー表彰2022」では受賞者によるショートプレゼン&パネルディスカッションも開催します。

セミナーなども充実しており、「共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT)」拠点関係者とのテーマ別セッションに参加できる文部科学省セミナーをはじめとして、毎年人気の「研究開発戦略センター(CRDS)セミナー」では、いま注

目する研究分野や国内外の動向をわかりやすく説明します。その他、未来社会創造事業の公開シ

ンポジウムや、CRESTとさきがけの研究者による領域セミナー、JSTの情報サービスの紹介セミナーも開催します。

公式サイトでは、展示会場で貴名受けに名刺を投函するように手軽に出展者とコンタクトできる「名刺送信・問い合わせ」機能、出展ブース内容の更新や研究者・出展機関からのお知らせがリアルタイムでわかる「出展者からのお知らせ」機能などを実装、参加者の関心のある研究分野に対応して出展ブースから「おすすめ展示」を紹介するなど、参加者と出展者のマッチング促進を充実させています。非常に盛りだくさんな内容となっていますので、ぜひご登録、ご来場ください。



イノベーション・ジャパン2022～大学見本市 & ビジネスマッチング～Online

公開期間：10月4日(火)10:00～10月31日(月)17:00

参加費用：無料(参加登録制)

主催：JST、NEDO

共催：文部科学省、経済産業省

<https://innovationjapan-jst-nedo.jst.go.jp/>



● 注目のセミナー & シンポジウム

● 開催日：10月7日(金)10:15～

「大学発ベンチャー表彰2022 受賞者ショートプレゼン&パネルディスカッション」

受賞者によるショートプレゼンと「産学連携とイノベーション」に関するパネルディスカッションを行います。

● 開催日：10月6日(木)12:30～

JST未来社会創造事業 公開シンポジウム「顕在化する社会課題とその解決への挑戦」

経済・社会の発展とともに一層深刻化する社会課題の解決を目指す持続可能な社会システムの構築を提示します。

● 開催日：10月6日(木)14:00～

JST研究開発戦略センター(CRDS)セミナー

各分野・主要国の科学技術イノベーション動向を調査・分析しているエキスパートが、いま注目する研究分野や国内外の動向についてわかりやすく説明します。

● 開催日：10月14日(金)13:30～

文部科学省セミナー「SDGsの達成のために私たちができること～10年後のありたい社会像の実現に向けて～」

社会課題解決に向けた国プロジェクト「共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT)」の拠点関係者によるテーマ別セッションです。

JST戦略研究推進部のCREST、さきがけより「未来材料」「共生インタラクション」「人工知能」の領域セミナーのほか、JSTの情報サービスの紹介など各種セミナーを実施。詳しくは公式サイトでご確認ください。

さがける 科学人

vol.120

大黒 亜美 Oguro Ami

広島大学 大学院医系科学研究科 助教

Profile

兵庫県出身。2012年関西学院大学大学院理工学研究科生命科学専攻博士後期課程修了。博士(理学)。同大助教、広島大学大学院統合生命科学研究科生命医科学プログラム助教などを経て、22年より現職。22年より創発研究者。



学会で訪れた北海道にて。「さっぽろ羊ヶ丘展望台」のラベンダー畑に癒されました。

Q1. 研究者の道へ進むきっかけは？

A1. 学生時代の論文が高評価 この酵素の機能を解明したい

幼少期に初めて音読したのが「みどりのみ あかいみ」という植物の絵本でした。キリンが表紙の「せぼねのある動物たち」という本も大好きでした。今思えば、小さな頃から生物に興味があったのかも知れません。高校では、身近な話題から生命の面白さを教えてくれた生物の授業がとても楽しく「もっと知りたい」という思いから理系の進路を選択しました。

薬物代謝酵素の1つであり生体内の脂質代謝物の生成にも関わる「可溶性エポキシド加水分解酵素」について論文を発表したところ、この酵素の発見者から「とても面白い論文ですね」とメールをいただきました。また国際学会で発表した際には活発なディスカッションが行われ、多くの研究者から「論文を読んだよ」と声を掛けられました。こうした経験から、自分が発信した論文が世界と結びつくことに深い喜びを感じました。当時は日本で可溶性エポキシド加水分解酵素に取り組む研究者がいなかったので「自分の手でこの酵素の機能を解明して、世界に発信したい」という思いが高まり、研究者の道へと進みました。

Q2. 匂い物質と薬物代謝酵素の関係は？

A2. 脳の「嗅球」で多く発現 香害を解決するヒントに

薬物代謝酵素は外部から入ってきた異物を水に溶けやすくしてから体の外に排出する役割を果たしています。主に肝臓で働く酵素ですが、微量ながら脳など体

内のさまざまな場所にも存在しています。脳のどの部分に多くあるのかを調べたところ、鼻腔の嗅上皮と大脳を結び、匂い分子の情報を嗅覚中枢へと伝える「嗅球」と呼ばれる領域で多く発現していることがわかりました。

近年、鼻は脳に薬を直接届ける経路としても注目を集めています。例えば、血液から脳に薬剤を届けようとしても「血液脳関門」などのバリア機能があり、なかなか物質を届けることができません。しかし、鼻から吸ったものは、良いものも悪いものもそのまま脳に届いているのではないかと考えました。そこで、匂い物質が嗅球を通して脳に移行し得るのであれば、薬物代謝酵素は嗅球で匂い物質を代謝する役割を担っているのではないかと仮説を立てました。

脳内における薬物代謝酵素の働きにこれまで誰も着目していませんでしたが、ここに化学物質過敏症のような「香害」を解決するヒントがあるのではないかと考え、研究課題として取り組むことにしました。薬物代謝酵素による匂い物質の代謝以外にも、この酵素によって生成される脂質代謝物の働きである血管の拡張や収縮作用、



さまざまな匂い物質をあらゆる濃度でマウスに曝露する装置。マウスの不快感を行動試験で評価し、脳内のたんぱく質変化などを解析します。

嗅上皮や嗅球の神経細胞の増殖を制御する作用など、さまざまな視点から研究を進めています。香害で苦しんでいる人の助けになる治療法につなげていきたいですね。

Q3. 研究者を目指す人たちにひと言

A3. 試行錯誤の連続が糧に 身近なことに疑問を持って

研究はうまくいくことばかりではありません。期待された成果を出せないことの方が圧倒的に多いのが現実です。その中でよく考え、試行錯誤を続けていくと、自分にしか気づけない「小さな発見」が必ずあります。この発見が研究の糧となり、やがて大きな実を結びきっかけになると信じています。

私の原点は、身の回りにある不思議を解き明かしてくれた生物の面白さです。

身近なことに疑問を持ち、それに答えられる研究者を目指していきたいです。

(TEXT:
JST広報課
小倉一恵)



身近な疑問が研究の源 小さな発見を大きな課題に

