ISSN 1349-6085

JST news

未来をひらく科学技術

6 June 2019

特集

情報科学との協働で栽培技術を革新

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

JSTnews 6 June 2019

03 特集
情報科学との協働で
栽培技術を革新

05
100メートル上空
から作物個体の
生育を観察

08
農家の経験を受け継ぐ
人工知能
甘いトマトは作れるか

12 数字に見る科学と未来
節水型耐乾性コムギを開発
乾燥地帯を世界の穀倉に変える

14 NEWS & TOPICS
未来の食料問題の解決に挑む
「ありたい『2050年の食卓』」を産官学民が議論

16 さきがける科学人
オンリーワンの実力が
共に歩む仲間をつくる
東京理科大学 工学部
准教授　田中 優実

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。

P15(上)　P14

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

情報科学との協働で栽培技術を革新

大自然と向き合う農業は、農家の経験と勘に大きく依存してきたが、情報技術を活用してデータに基づくものへと姿を変えようとしている。さきがけ「情報科学との協働による革新的な農産物栽培手法を実現するための技術基盤の創出」研究領域は2015年に誕生した。農学・植物科学と情報科学の研究者がそれぞれの強みを生かして連携することで、作物の品質や収量を向上させる革新的な栽培技術の確立を狙う。6月号特集は、二宮正士研究総括のインタビューと、今年3月に研究課題を終えた1期生の研究成果を紹介する。

21世紀農業を実現し食料問題の解決に貢献

育種研究の道を邁進（まい）してきた二宮正士研究総括が情報科学と出合ったのは、1983年に東京大学農学部生物測定学研究室の助手に着任したことがきっかけだ。数学科出身の教授が率いる研究室で、数理統計の基礎に戻って勉強したことが、その後の研究に大いに役立ち、農学・植物科学と情報科学の融合分野を立ち上げていく原動力になっているのだという。

さきがけ「情報科学との協働による革新的な農産物栽培手法を実現するための技術基盤の創出（以下、「情報協働栽培」）」研究領域の目的として、二宮さんが真っ先に挙げるのは食料問題の解決だ。人口増加が世界規模の食料不足を引き起こすといわれるが、「開発途上国の経済成長に伴う中間層が増大し、動物性食品の需要が急激に伸びることも要因」と指摘する。

所得が向上するにつれて、主食の穀物への依存度は減り、家畜由来の肉や乳製品、油脂類などの消費量が増える傾向にある。しかし動物性食品の生産効率は非常に低い。トウモロコシを食べれば人口分の食料を賄えるところ、牛肉でおなかを満たそうとすると、20倍の量のトウモロコシが餌として必要になる。

食料危機を防ぐために農学への期待は大きいが、単に生産性を上げることのみならず、食の嗜好や機能性の追求、自然環境への配慮など多くが求められる。20世紀農業は増産に成功した一方で、化学肥料と化学農薬、灌漑（かんがい）に依存したため、環境負荷が大きく、持続性に乏しかった。もはや熱帯雨林を伐採して耕地を拡大することは困難で、作物生産に必要な水資源にも限界がある。

21世紀農業のあるべき姿は、「数多くの困難な制約の下でも、質と量を満たす作物を安定して生産できること」と二宮さんは語る。食を巡って複雑化する問題を解決し、高収量で高品質な作物をもたらす持続的な農業生産を実現するのに、「極めて強力なテクノロジー」となるのが情報科学だ。

計測技術とデータ科学で農業の壁を乗り越える

労働力不足や技術継承を背景に、経験と勘に頼る農業からデータに基づく農業への転換が期待されている。これまでの技術では、作物を全生育期間にわたって計測し続けることは難しく、いわばスナップショット的なデータしか得られなかった。

しかし近年の先端計測やデータ科学は目覚ましく発展した。センサー技術の高度化によって、気象や土壌の環境データ、肥料や農薬使用の栽培管理

データ、作物の生体データを効率的かつ高精度に取得し、しかも膨大なデータを時系列に蓄積できるようになった。加えて、過去データを活用することで、1年間に栽培できる回数が限られる作物のデータを増やせる。

これらの農業ビッグデータを数理・情報科学的な手法により解析して、目的とする収量や形質を得るための植物の生育・環境応答の予測モデルを構築し、さらには野外環境での実証も試みるのが「情報協働栽培」研究領域だ。その一番の特徴は「挑戦的であること」だと二宮さん。「シロイヌナズナやミヤコグサなどモデル植物ではなく、人類が生活で使っている実用植物に取り組み、真正面から食料問題を考えたい」と力を込める。

農学・植物科学に情報科学を取り入れる試みは過去にもあったが、「不確実性や地域特異性といった、農業の特殊性が壁となって阻まれてきました」。不確実性とは生産において自然環境の影響を受けやすいことで、地域特異性は栽培の方法や品種が地域によって異なることをいう。「どんな不確実性や地域特異性がある環境にも適応した植物栽培を実現する研究をしよう」と、実験はできる限り屋内ではなく野外で行うことに挑戦した。

異分野交流の場づくり 人材育成と研究の深化

「農学・植物科学と情報科学の融合分野は人材が極めて限定的です」。募集に当たって二宮さんは「新たな分野を創出するという気概を持って参加してほしい」と呼びかけた。1期生から3期生まで18人の「いずれも斬新な発想を持つ若手研究者」を採択した。

研究領域を運営する上で大事にしたのは自由闊達（かったつ）な雰囲気をつくることだ。「大きな課題に思いきり挑戦し、伸び伸びと研究してもらいたかったので、失敗しても、自分が責任を取るから心配しなくていい、と繰り返し伝えました」。合宿形式の領域会議や研究現場を訪ねるサイトビジットでは、データ取得方法や情報科学的解析に加えて、個別に必要な支援や連携を中心に「とにかくたくさん議論した」という。

農学・植物科学研究者は情報科学を、情報科学研究者は農学・植物科学を積極的に学ぶように促した。「現代の科学ではなかなか1人で研究をまっとうすることはできません。幅広い分野の知識と技能が融合しないと1つの研究は組み立てられないようになっています」。その他、農業ビジネスの展示会に出展して企業研究開発者との接点を設けたり、さきがけ新分野開拓セミナーと銘打って材料科学や計測など異分野研究者との交流を設けたり、異分野の知見を取り入れて自身の研究を深めるための仕掛け作りに努めた。

世界に広がる活躍 次世代のリーダーに

成果の国際的認知を高めるために、若いうちから国際会議で議論する経験をしてほしいと、世界から研究者を招いたワークショップも開催した。その1つが2017年12月に東京で開催したフェノタイピングの国際ワークショップだ。

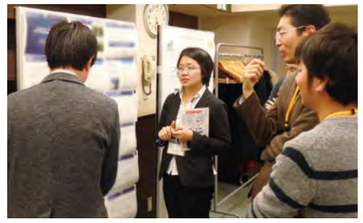
近年の植物科学では、形態や構造など植物の表現型データを解析するフェノタイピング研究が注目されている。遺伝学や生理学との連携で、農学・植物科学に有用な知見を得られると、欧米で研究が加速している。この動向を意識し、「新しいことは常に世界と一緒にやった方がいい」と、「情報協働栽培」研究領域が主催した。国際ワークショップは、議論したいテーマや講演者に至るまで、この研究領域の研究者が主体的に企画したことで、非常に魅力的な内容になったという。

これが機運となって「情報協働栽培」研究領域の研究者らが中心となり、国内組織「JPPN（日本植物フェノタイピングネットワーク）」を今年4月に設立した。「JPPNの立ち上げをきっかけに日本の遅れを取り戻し、フェノタイピングの分野の研究の裾野を広げてもらいたい」と二宮さんは期待を寄せる。サイエンス誌を発行する米国科学振興協会が18年に創刊した「Plant Phenomics（プラント・フェノミクス）」のエディターとしても活躍している。

何より嬉しかったのは、研究者同士で連携し、「情報協働栽培」研究領域で収集した多様なデータを誰もが使えるような体制を整える動きが出ていることだという。「従来は研究で得られたデータは研究が終わるとしまい込んでしまうことが多かった。それが研究の資産を広く生かしてもらう動きが出てきたのは大変喜ばしいことです」。

今年3月に1期生6人が研究課題を終えての手応えと、2期生と3期生への期待を、二宮さんはこう語る。「情報科学の専門家だったのが、農学の研究者と対等に議論できるほど勉強して農学の世界でも実力を認められるなど、分野の壁を乗り越える研究者が出てきています。2分野、3分野とまたいで、その経験を生かして新しい分野を切り拓き、次世代のリーダーになってほしいというのが私の希望です」。

領域会議でポスターを前に意見を交わす。

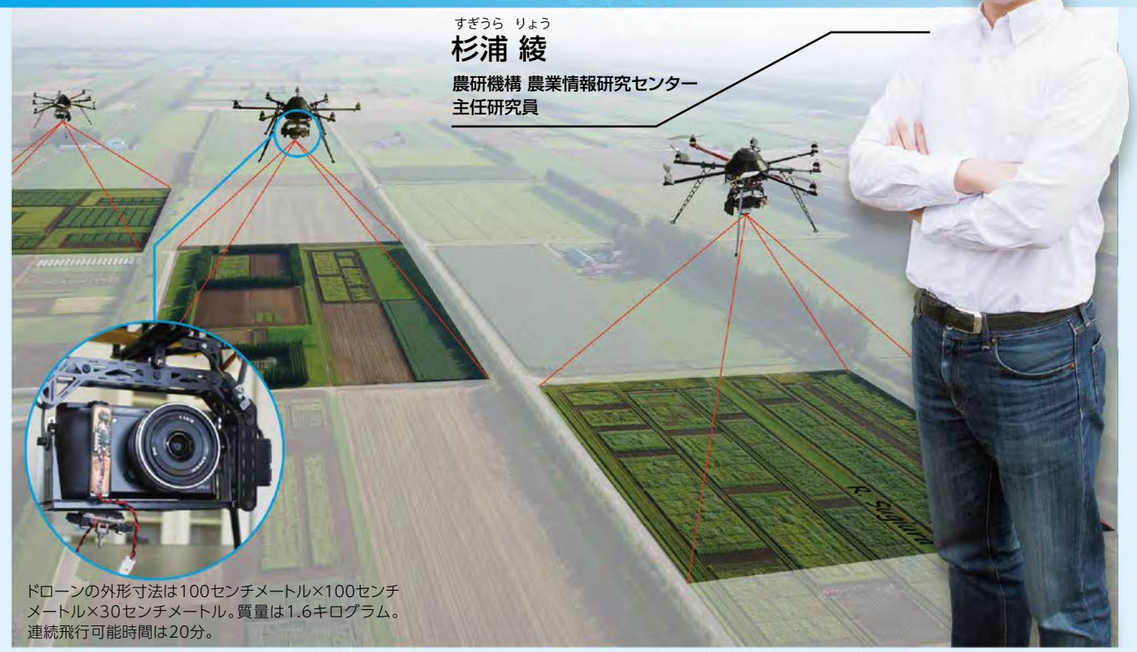

熱い議論は夜まで続くことも。

広大な畑を空撮するドローンを研究実施現場で説明。

領域会議終了後は全員で記念撮影。

100メートル上空から 作物個体の生育を観察

ドローンで空撮した広大な畑の画像を解析し、作物個体の生育情報を得ることに成功したのは、農研機構農業情報研究センターの杉浦綾主任研究員だ。葉の長さや表面温度、草高などを計測し、何万もの作物の時系列変化や病害を個体ごとに検出する。野外環境で育つ作物の形質を高効率に計測・評価する技術は、栽培研究や農業の現場を大きく変える可能性を秘める。



ドローンの外形寸法は100センチメートル×100センチメートル×30センチメートル。質量は1.6キログラム。連続飛行可能時間は20分。

手作業では困難な 形質計測を効率化

日本最大の畑作地帯を誇る北海道十勝地方。畑の平均面積は数ヘクタールで、10ヘクタールに達するものも少なくない。これだけ大規模になると、同じ畑でも作物の生育にばらつきが出て、全体の品質や収量を下げる。「畑が大きいからと大雑把に管理するのではなく、より精密に作物の生育状態を把握したい」と、農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）農業情報研究センターの杉浦綾主任研究員は語る。

ばらつきは畑を横から見渡すだけではわからない。畑の中に入り、膨大な時間と労力をかけて確認する作業が必要だった。「作物の草高を1つ1つメジャーで測ったり、生育の良し悪しや病害の発生状況を目で確かめたりしますが、これが非常に大変です」。しかも実験室ではなく野外環境のため、夏場であれば、炎天下を歩き回らなければならない。当然ながら作業量には限界があり、「一日かけて取れるデータはせいぜい数10点から多くても100点」と形質や生育の時系列データが十分にそろわず、遺伝子情報との関係など網羅的な解明ができていなかったという。

「データを豊富に集めれば、もっと面白い栽培研究ができるはず」と、広大な畑での作物の生育を効率的に計測する手法を開発することを目指した。

ドローンの自作に成功 目視評価なみの精密さ

「生育のばらつきは、意外にも上空から俯瞰した方がわかるのです」と杉浦さん。ムギの生育を無人ヘリで計測した経験から、空撮画像が地上の目で見るのとはまったく違う効果をもたらすことに確信を持っていた。「ドローンはヘリよりも機体の構造が単純で、メンテナンスが格段に楽です。機械の故障も起きにくいし、何より安定感が違います。プロペラが8枚あり、飛行中に1枚や2枚が止まっても、残りのプロペラで飛んでいられるので、墜落のリスクは無人ヘリより低いのです」。

ドローンが一般に普及している現在と違い、研究を始めた8年前は、かなり特殊な機器として市販されていた。「1機1000万円はしたので、とても手が出せませんでした」。そこで杉浦さんは計測用のドローンを自作することにした。モノづくりは学生時代から好きで、農業

■図1 地面では作物がそろって見えるが(左下)、100メートル上空から見下ろすとばらつきが明確にわかる(左上)。1画素が地上の3センチメートルに相当し、作物個体が識別できるほど高精細に撮影できる(右)。

機械学の博士号を取得した。約20万円で必要な資材をそろえ、初号機を完成させた。初回の飛行では、「墜落しないようにと地上から祈るばかりだった」が、見事に空を舞った。

あらかじめプログラムした目標経路に沿って、GNSS(全球測位衛星システム)で自律飛行し、搭載した一眼レフカメラで畑を空撮する仕組みだ。使用方法が簡単であることに加えて、運用コストも低いので、頻繁に撮影できるのも長所だ。最初に撮った1枚を見た時は感動したという。空撮画像から得られた生育情報は、目視評価と比較しても十分な精度だった(図1)。

「ドローンを使うことには賛否両論がありました」と杉浦さんは振り返る。不安定で使い物にならないのではないか。上空から見ることで何がわかるのか。ドローンによるビッグデータの活用は、多くの研究者にとって未知の領域だった。杉浦さんを常に勇気付けたのが二宮研究総括だった。「『周りは気にせず、どんどん行け』と後押ししてくださったのはありがたかったですね」。

今や稼働させるドローンは7台にも上る。自作した初号機は一度も墜落することなく、現役で活躍している。

生長量や病害を検出 3次元形状も復元

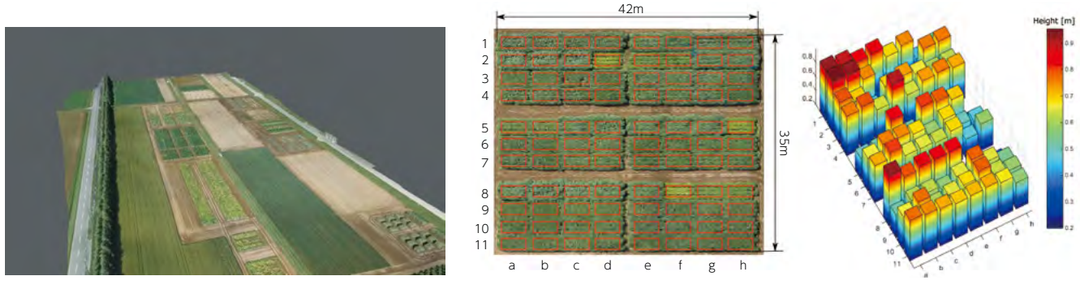
パレイショが5月に萌芽し、9月に葉を枯らすまでの4カ月間、杉浦さんは数日に1回、約4ヘクタールの畑でドローンを飛ばした。約10秒で高度100メートルに到達し、秒速4メートル、2秒に1回の頻度で撮影する。1回の空撮に必要な時間は離陸から着陸までわずか5分程度だ。「畑に育つ全個体を一度に記録できるので、日々変化する作物の生長を捉えるのに最適な方法です。まるで上空に定点カメラを設置したかのような画像を撮れます」と杉浦さん。

同一経路で定期的に撮影したことで、パレイショの全生育過程の変化を時系列に蓄積できるようになった。「収穫してしまえば何も残りませんが、過去の畑の様子をいつでも再現できるのです」。過去の生育過程を追跡して、現在の生育と比較するなど、これまでできなかった解析に道を拓く。

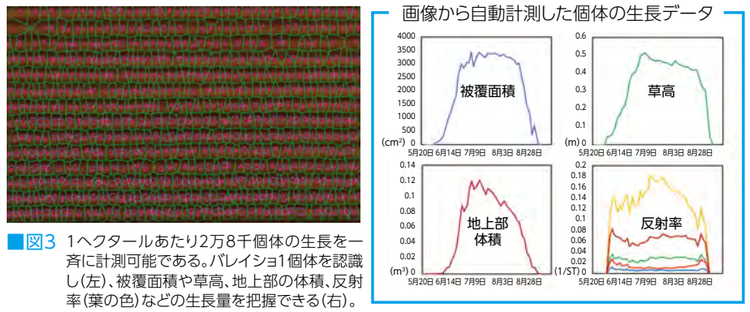
1回の撮影で捉える範囲は100メートル×150メートルで、畑の一部しか写らないが、約60枚に上る空撮画像をパッチワークのように合成すれば、4ヘクタールの畑が1枚の画像になる。さらに、隣接する画像の重なりを利用して、畑の作物や地形の3次元形状を復元できる。草高など作物の大きさの他、畑の微細な地形が計測可能だ(図2)。

驚くべきことに杉浦さんは、4ヘクタール分の画像に写る何万という作物個体の中から1個体の位置を検出するプログラムを開発した。3年かけて集めた膨大な画像から葉の領域のみを自動抽出して、葉の色や表面積、地上部の体積などの生長量を得ることに成功した。杉浦さんの強みは、群落ではなく、個体ごとの生長量の把握を実現したことだ(図3)。

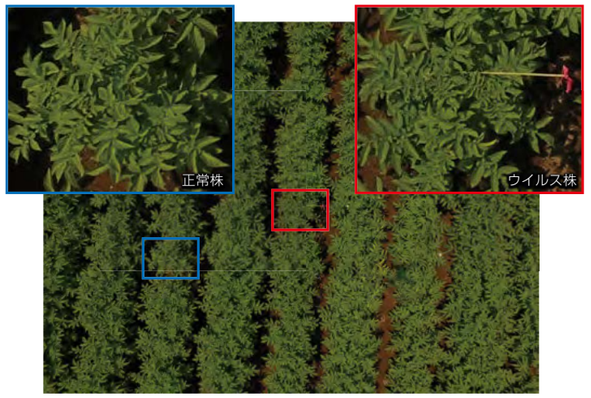
ドローンに近赤外線カメラを搭載すれば、葉の色や表面温度を計測できる。葉の表面温度からは葉が受けるストレスが推定される。病害にかかると葉の



■図2 畑の3次元形状(左)。撮影したダイズ畑を、肥料や個体同士の間隔、品種など条件によって88領域に分け(中央)、各領域の平均草高を算出した(右)。草高を時系列に計測することで、個体の倒伏や条件の違いによる成長速度への影響を推定できる。



■図3 1ヘクタールあたり2万8千個体の生長を一斉に計測可能である。パレイショ1個体を認識し(左)、被覆面積や草高、地上部の体積、反射率(葉の色)などの生長量を把握できる(右)。



■図4 パレイショの葉の表面が褐色に変化するのを検出して、病害の進行度合いを評価する(6メートル上空から撮影)。

表面が褐色に変化する。症状が微妙なため検出には熟練の目が必要だったが、色の変化から病害の進行度合いを評価する機能も開発した(図4)。数ヘクタール規模の畑でも病害の発生を見逃さず、被害拡大を抑えられる。

個体収量が推定可能に 土壌状態の把握にも活用

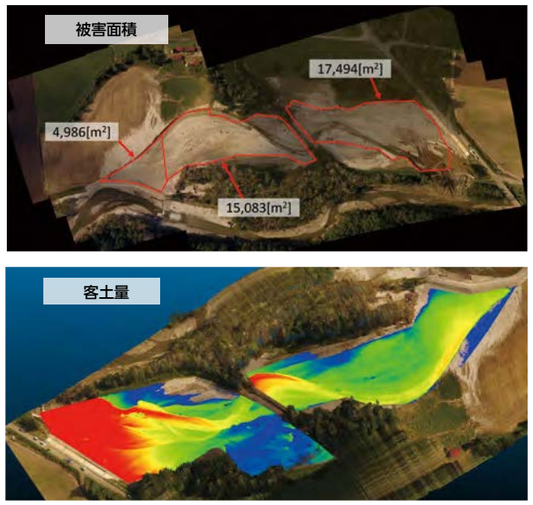
「栽培面積が広い畑での試験研究は難しかったのですが、これからは調べたいだけ畑をつくれるようになるでしょう」と、より広域な畑での栽培研究への応用に力を入れる。計測の労力を大幅に削減するだけでなく、計測者の主観を取り除いた客観的な評価手法である。

最終的な狙いは、生育情報、環境情報と収量を結ぶ関係の解明である。「データを取得しただけで終わらせず、見いだした栽培知見を生かしたい」と、独学で機械学習の習得に挑んだ。計測したパレイショ個体の地上部の生育情報と、地下部の塊茎の質量、すなわち収量との関連を機械学習で調べようというアイデアだ。野外環境での撮影であるためデータの質が安定せず、機械学習の精度を上げるのに時間がかかったが、地上部生長量と収量に強い関連が見えてきているという。

これまでは畑ごとの収量すら把握できなかった。それが畑1枚ごと、あるいは個体ごとに収量や収穫適齢期を予想できれば、追肥による収量向上など、個体ごとに処置を変える究極の精密農法が可能になる。出荷スケジュールや加工工場の稼働計画への反映や、最小限の農薬で済ませる環境にやさしい農業を実現できるだろう。

土壌状態の把握にも技術が応用されようとしている。十勝地方はうねりのある畑が多いことが特徴だが、高低差を埋めて平らにするのに必要な採土可能量を推定できる。2016年8月、北海道を大型台風が立て続けに襲った。被害実態の調査で、被災した農地の上空をドローンで空撮し、画像を3次元データに構築したところ、削られたり水没したりした農地の実態を定量的に捉えることができた。そこから災害復旧にかかる土砂の必要量やそれを確保するための予算を迅速に割り出すことにつながったという(図5)。

農学と植物科学の将来や情報科学との協働の意義について、杉浦さんは次のように語る。「効率的にデータを取るのに自動化やロボット化は欠かせません。データを取るほどに面白いことがわかるので、これからの農学や植物科学にとって情報科学との連携は必須になってくるでしょう」。農と情報をつなぐ人材を育成すべく後進の指導にも当たっている。「SFの技術が現実になる時代です。農業もかなり突拍子もないことをやってもいいのではないでしょうか」。自らの研究世界を追究する杉浦さんの目線は、あたかもドローンから見渡すように高く、農業研究の広い地平を見つめている。



■図5 2016年8月に相次いで発生した台風による大雨で河川が氾濫した。9月14、15日に被災した約90ヘクタールの畑を空撮したところ、復旧に必要な搬入土の量(客土量)は134,698立方メートルと推定された。

農家の経験を受け継ぐ人工知能 甘いトマトは作れるか

フルーツのような甘さで人気の高糖度トマト。ハウス栽培で成功の鍵を握るのは水やり（かん水）の制御だ。糖度を高めるには生育が阻害されるギリギリの線までかん水を控える必要があるが、その見極めは農家の経験と勘が頼りだった。そこに風穴を開けたのが静岡大学学術院情報学領域の峰野博史教授だ。高糖度トマトの安定的な生産に生かそうと、植物の状態を推定し、かん水を制御する人工知能（AI）の開発に挑んでいる。

温度、湿度、明るさを計測するセンサー

葉の姿を捉えるカメラ

みねの　ひろし
峰野 博史
静岡大学 学術院情報学領域
教授

栽培に不可欠な水分量の調節 不十分だった植物との対話

トマトは土壌の水分を極力減らして栽培すると糖度が高まることが知られている。一般には糖度8以上が「高糖度トマト」や「フルーツトマト」と呼ばれる。水分量を調節しやすいよう、肥料を溶かした水（養液）の量を点滴で調整したり、根の広がりを抑えたりといった栽培の工夫もなされるが、枯れる一歩手前を見極め、かん水のタイミングを計るのは知識と経験に裏打ちされた農家の目だ（図1）。この農家の目に代わって植物の状態を見極め、かん水のタイミングを判断するAIの開発に取り組むのが、静岡大学学術院情報学領域の峰野博史教授だ。

トマトの栽培では、水分量の制御に日射量が使われることが多い。日射量の積算値が事前に設定した値に達したら、自動的に給水するシステムだ。峰野さんに現地試験場を提供している「サンファーム中山」（静岡県袋井市）でも、この方法を使っていた。

しかし、実際に植物が必要としている時に適量の水を与えていたかといえば、「そうではなかった」と同社の玉井大悟代表は言い切る。トマト栽培に長けた玉井さんは「従来のシステムでは、かん水するタイミングで考慮しているのは日射量だけで、気孔からの蒸散に影響する温度や湿度などは含まれていません。植物と十分に対話できていないと思っていました」と話す。

水分量を減らし過ぎると、うまく生育せず果実が小さくなるだけでなく、病気や害虫にも弱くなる。トマトの品質向上を目指したつもりが、水分調節に失敗して収量を落とすこともあり、安定した栽培は難しい。

葉の上下運動に着目 しおれ具合の定量化に挑む

峰野さんの狙いは、植物の状態を把握しながら適切にかん水するAI栽培技術を確立することで、かん水の負担を軽減しつつ、糖度と収量も両立させることだ。そこで、まずは植物が感じている水分ストレスの見極めに取り組んだ。着目したのは、熟練の農家がかん水のタイミングをどう見極めているかだった。農家が植物の水分ストレスをどのように捉えているかを明らかにできれば、それを定量化してシステムに組み込める。そう考えて農家に聞き取りをすると、どうやら葉の下向き加減、つまり「しおれ具合」を判断基準にしていることがわかってきた。そこで定点カメラで観察すると、確かに時間の経過とともに葉が上下していた。

「理科の授業で習ったように、光が当たると気孔が開き蒸散が促進され、根から水を吸い上げます。土の水分が不足していると植物体内の水分が減り、茎は細くなり、葉の張りも無くなって葉の重さを支えきれなくなるようですが、水が与えられると葉は再び持ち上がっているようでした」と葉の上下運動を説明する。

そこで峰野さんは考えた。葉が上下する動きや温度や湿度など環境に関するデータなどからしおれ具合の特徴を定量化できれば、最適なかん水の量と時期を予測できるのではないか、と。峰野さんの専門は情報科学だが、さきがけ開始後に植物生理を猛勉強し、買い求めたこの分野の本の冊数は「本棚一段分くらい」。二宮研究総括や領域アドバイザーが研究現場を訪問するサイトビジットや、領域会議でも、データを見てもらいながら有意義なアドバイスを得た。こうして新たに身に付けた知識が、研究アイデアの実現につながった。

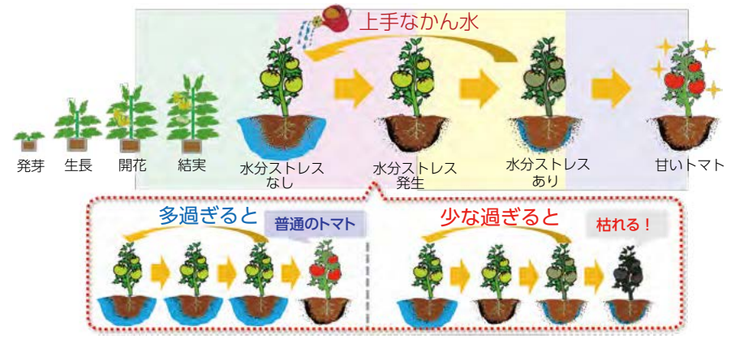
AIで水分ストレスを予測 葉の姿と環境情報をモデル化

しおれ具合に関する特徴を取り出すため、ハウスに定点カメラと無線環境センサーを複数設置し、時系列で得られる植物の画像、茎の太さ、温度、湿度、明るさなど多種類のデータを収集した。特徴抽出に用いたのはマルチモーダル深層学習という手法だ。マルチモーダルとは複数のセンサーから得られる画像やデータといった異なる様式の情報を組み合わせて処理することで、深層学習とは多層のニューラルネットワークによる機械学習を指す。人間が視覚、聴覚、触覚など多様な情報を統合して処理しているように、複数の情報を組み合わせることでAIの精度や頑健性の向上が期待できる。

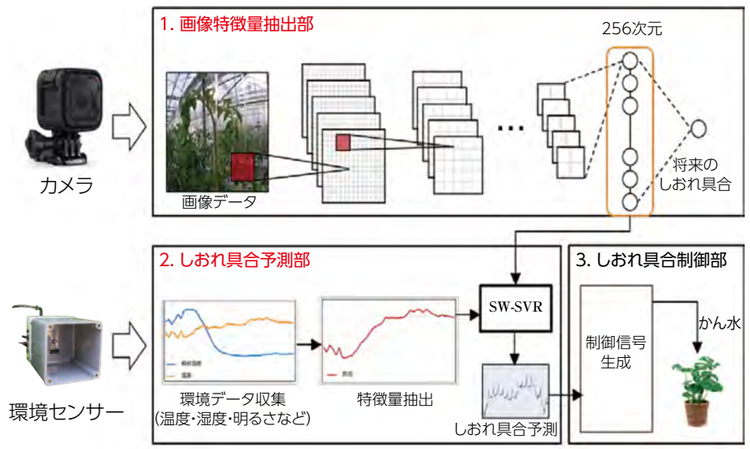
峰野さんらが開発したAIは3つの部分からなる（図2）。1つは、画像データからしおれ具合の特徴を抽出し、将来のしおれ具合を「茎の太さ」として予測する画像特徴量抽出部だ。

緑のトマトでは、色の濃い部分と薄い部分がはっきりと分かれている。熟練農家は上手に栽培できていることを、この色の違いで確認している。

しかし、画像データのみからの予測では当然精度が低い。そこで、続くしおれ具合予測部で、しおれに影響を与える温度、湿度、明るさといった環境データから抽出した特徴量と、1つ目のモデルから得られた特徴量を統合し、しおれ具合、つまり茎の太さを予測する。得られた予測値に応じて、



■図1　少ない水で栽培することでトマトは甘くなる。しかし、水を減らし過ぎると枯れてしまうため、植物の状態を見極め、水やりのタイミングを計る必要がある。



■図2　カメラで捉えた葉の画像データと各種センサーからの環境データに基づき、しおれ具合の特徴量を抽出し、水分ストレスの指標となる茎の太さを予測する。予測に基づき、かん水を制御する信号が生成される。

■図3 予測された茎の太さに応じて、ハウス内に設置された養液タンクから自動的にかん水する(左)。タンクから伸びるホースはそれぞれの株の根本につながっていて(赤矢印)、水分量を調節している。

しおれ具合制御部が自動的に給水する仕組みだ(図3)。農家が環境や作物の状態から変化を予測して毎日のかん水の量を決めるのと同様に、画像や環境情報からしおれ具合の指標である茎の太さを予測し、予測値に基づいてかん水を制御するAIが実現できたのだ。

開発にあたり峰野さんらがこだわったのは入力データ量の削減だ。それぞれのデータを膨大に収集して特徴を抽出すれば、それだけ精度は上がる。しかし、入力前のデータ処理やアルゴリズムなどを工夫し、少ないデータで同等の精度を持つシステムを目指した。

「データが多ければ精度は上がりますが、データの収集が仕事になってしまうことは避けたかったのです。力技でデータを集めることもできますが、GAFA(米国に拠点を置く主要IT企業4社)にはかないません。データの規模で勝負するのではなく、少ないデータ量で高い精度を実現しようと考えました」と峰野さんは説明する。

少ないデータでも精度向上 環境変化にも自ら適応

このための工夫の1つが、コンピューターが特徴を抽出しやすいよう元画像を加工する方法だ。ひらめいたのは、学生と一緒に画像データを見ていた時だった。カメラの画像には、植物だけではなくビニールハウスの部材や背景などさまざまなものが映っている。ぼんやりと見ているうちに、人間は無意識に動いている葉の周辺だけを観察しているという当たり前のことに気づいた。

「コンピューターは人間と違い、画像に映る全ての情報を見てしまいます。それならば、見てほしいところだけを抽出して与えればいいと思いつきました」と振り返る。

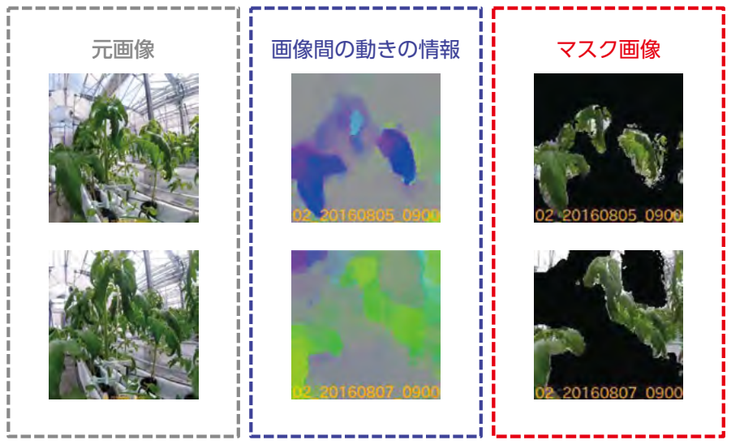
そこで時系列の画像を比較して葉の運動量をベクトル化し、ベクトルの大きい部分、つまり動いている葉の周辺だけをくりぬく手法を確立した(図4)。

もう1つの工夫が、しおれ具合予測部で用いた適応型学習器「SW-SVR」という学習アルゴリズムだ。多くのデータがあれば予測の精度は上がる。一方、この学習器では、多くのデータをそのうちのごく一部で表現することでデータ量を削減している。

「私たちが明日の気温を考える時、過去の全ての記憶を使って想像しているわけではありません。使っている情報はごく一部です。では、そのごく一部をどうやって選んでいるのかというと、夏の情報、明け方の情報といった具合に情報を特徴によって分類し、グループ化(クラスタリング)しているだろうと考えました」。

このようにクラスタリングすると、グループごとにデータのばらつきが生じる。そこで重心からのばらつきに応じて半径を設定し、その円内に含まれるデータだけを使ってグループごとのモデルを構築する。こうして構築した複数モデルの予測値の加重平均を取って、状態を推定するのが、この学習器の特徴だ(図5)。気温の予測を例に取ると、冬の朝について推定するのであれば夏や夕方に関するモデルの予測はさほど考慮しないといった具合に、データ値により近いグループのモデルが重要であるとして予測する。未知のデータであっても、それぞれのグループからの距離に応じて重み付けし、予測値の平均を取るため、安定した精度を得られる仕組みだ。

こうした工夫により、精度をある程度維持したまま、データ量を10分の1に削減することに成功した。データが増えてきて誤差が大きくなった際には、クラスタリングをやり直しモデルを再構築する機能も組み込んでおり、環境変化など状況に合わせて自ら学習し、精度を維持できる。



■図4 元画像からしおれ部分を上手に抽出する。人間の目が自然に行っているような要素抽出により、データ量を大幅に削減できる。

現地試験で高糖度を確認 品質と収量の安定化に期待

開発したAIは早くも実際の事業につながろうとしている。2018年には農業AIを扱う大学発ベンチャーとしてアグリエア(静岡県浜松市)が立ち上がった。

起業のきっかけは、玉井さんや農作物の生産から流通までを一貫して扱うハッピークオリティー(静岡県袋井市)の宮地誠代表取締役との出会いだった。宮地さんは玉井さんの協力の下、高濃度トマトのブランド化を目指していたが収量と品質がなかなか両立できずにいた。技術指導も実施したが、技術の普及が追いつかない。そんな時に目に飛び込んだのが、「高糖度　AIにお任せ」という新聞記事の見出しだった。記事では峰野さんの技術が紹介され、さらに「現地試験を進める予定」とあった。

宮地さんと玉井さんはすぐさま静岡大学に連絡し、サンファーム中山を現地試験場とすることを提案したという。峰野さんにとっても、大学の近くに試験場を確保でき、また農家や市場の感触も知ることができるありがたい申し出だった。決断に時間はかからなかった。早速開始した現地試験では、農業AIによりかん水を自動化し、高濃度トマトを安定生産することに成功した。試験開始から2年が経った現在では、最高糖度16.9、平均糖度8.87を達成している。この技術を社会に還元するために起業したのがアグリエアだ。

同社でも代表取締役を務める宮地さんは「農家の所得が上がらないことが問題になっていますが、最大の理由は技術です。技術が安定しないから品質や収量も安定しない。峰野さんが開発したAIは高糖度トマトで所得を向上したい農家にとって大変有益だと思います」と意義を語る。

望む生育状態から環境設定も 他品種への応用も目指す

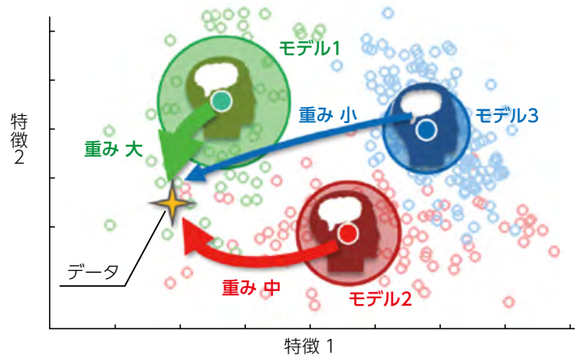
現在のシステムは農家での導入を想定しているが、レベルに応じて使い分けければいろいろな活用が可能だ。例えば、家庭菜園での利用であればカメラのみ、あるいは安価なセンサーのみで十分な精度は出せる。また、予測値に基づき自動かん水システムを制御する代わりに、かん水のタイミングをメール通知するといった利用法も考えられる。

教育現場から「プログラミングの演習で使いたい」という声も寄せられていることから、より簡便化したバージョンをウェブサイト上で公開することも検討中だ。「興味を持った子供たちが自作のかん水装置などと組み合わせて遊んでくれれば、教育の底上げにつながるでしょう」と目を輝かせる。

さまざまな利用に向け期待が高まる一方、まだ課題もある。現在取り組んでいるのは、他品種や異なる栽培環境にも適応可能なAIを構築することだ。品種や培地、養液濃度などに関係なく、かん水のタイミングを判断できるよう、さまざまな条件でトマトを栽培し、データを収集している。将来的には露地栽培にも利用したいと考えている。

さらに、これまで集めてきた環境データに加え、光合成量などの生理情報を集めたいと話す。生育に関する経時情報が得られれば、環境情報から生育を予測するのとは逆に、「望む生育状態」を再現するために環境をどう設定すれば良いかを導き出せるかもしれない。いずれは「囲碁のアルファ碁のように、AIが人間では思いつかない新たな栽培手法を提案できるかもしれません」と夢を膨らませる。

農家の高齢化が急速に進み、後継者や担い手不足が大きな問題となる一方で、農業を志す人も一定数存在する。農家が長い年月をかけて培ってきた「経験と勘」をAIで補完し、就農してすぐに優れた品質の野菜が生産できるとなれば、誰もが生活の不安なく、新たに農業にチャレンジできるだろう。農業の世界にも押し寄せる「働き方改革」。最新技術で効率性と収益力を高め、誰もが生き生き働き、より生産性を高めていく好循環を生み出していく。新しい社会の足音が聞こえてくる。



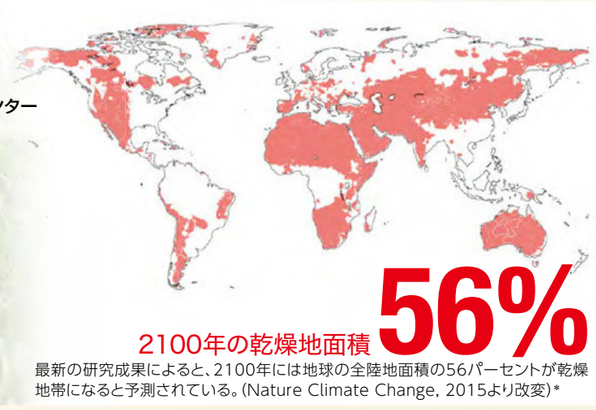
■図5 適応型学習器「SW-SVR」ではデータをクラスタリングし、グループごとのモデルを構築する(モデル1～3)。星印のデータから予測する場合、各モデルの予測値の加重平均を取るため、データから距離が近いモデル1(緑)の予測値が重視され、一番遠いモデル3(青)の予測値の重みは小さくなる。

数字に見る科学と未来 Vol.10

節水型耐乾性コムギを開発 乾燥地帯を世界の穀倉に変える

今年4月、国連世界食糧計画（WFP）などは、世界で1.1億人以上の人が飢餓に陥っていると発表した。人口増加に加え、地球温暖化による世界的な砂漠化や干ばつも食糧不足に拍車をかけている。2100年には全陸地面積の56パーセントが乾燥地帯になるという予測も出される中、乾燥化と食糧不足への対策として期待されるのが、水資源を有効活用できる「節水型耐乾性コムギ」だ。その開発に尽力する宇都宮大学バイオサイエンス教育研究センターの岡本昌憲助教の取り組みに迫る。

おかもと　まさのり
岡本 昌憲
宇都宮大学
バイオサイエンス教育研究センター
助教



2100年の乾燥地面積 **56%**

最新の研究成果によると、2100年には地球の全陸地面積の56パーセントが乾燥地帯になると予測されている。(Nature Climate Change, 2015より改変)*

世界的に増えるコムギの消費

コムギ、イネ（コメ）、トウモロコシは世界の3大穀物といわれ、人類にとって重要な食糧だ。農業技術の進歩や作物の品種改良などによって生産量は増加したが、農業に必要な水資源を十分に確保できない乾燥地帯は広がり続けている。世界人口の増加と乾燥地帯の拡大により、食糧不足は深刻化している。

「現在でも陸地の約40パーセントは乾燥地に分類され、そこに全人類の35パーセントが住んでいますが、乾燥地帯は今も広がっています。水の少ない地域でも良く育つコムギを開発できれば、穀物の生産量を増やすことができるでしょう」と岡本さんは研究の意義を語る。

岡本さんがコムギに着目した理由の1つに、コムギの需要増加がある。地球人口の増加に加え、それまでコムギを食べていなかった人たちがコムギを食べるようになったことも要因だ。日本でもコメの消費量が減って、コムギの消費量が増加しているが「アフリカのスーダンでも主食のソルガムの消費量が減少し、コムギの輸入量が増えています。コムギの消費量増加は世界的な潮流になっています」と岡本さんは指摘する。コムギはイネやトウモロコシと比べて、栽培面積こそ広いが、収量は低く留まっている。そこで、コムギの安定供給には乾燥地帯での栽培を可能にし、収量を増やすことが有効だと考えた。

気孔を閉じるホルモンに着目

植物はどうすれば乾燥に強くなるのだろうか。その鍵を握るのが植物ホルモンだ。動物が生きていく上で性ホルモンや成長ホルモンが重要な役割を果たすように、植物もホルモンを利用して生きている。地上の植物は共通したホルモンを持ち、1つのホルモンがさまざまな役割を果たす。植物の耐乾性に関与するのが、複雑な機能を持つ植物ホルモンの1つ、アブシシン酸だ。

植物の葉には光合成のガス交換を行うための気孔があり、気孔からは水分が蒸散している。アブシシン酸がこの気孔を閉じる働きを担っていることは知られていたが、「この仕組みが詳細に解明されたことで研究が大きく前進したのです」と岡本さんは話す。

通常の環境では、気孔を閉じるシグナルの伝達を担うSnRK2酵素はPP2C酵素により阻害されていて、気孔は開いた状態だ。しかし、乾燥などの環境ストレスによりアブシシン酸が生産されると、アブシシン酸と結合した受容体がPP2C酵素の働きを阻害する（図1）。これにより、SnRK2酵素が働くようになり、気孔が閉じるという仕組みだ。

単純に考えれば、アブシシン酸を増やせば気孔を閉じることができそうだが、そう簡単ではない。植物ホルモンが働く経路は複雑なため、どの部分に手を加えるのが良いのかを考える必要があった。岡本さんが選んだのは、複数あるアブシシン酸受容体の1つを増やす方法だった。

まずはモデル植物であるシロイヌナズナを用いて実験を開始した。2000年に植物としては初めて全ゲノム解析が完了しており、植物の特徴と遺伝子の関係が比較的よくわかっているという利点があった。アブシシン酸受容体の遺伝子をシロイヌナズナのゲノムに導入し、受容体を多く持つ個体を作出して調べたところ、乾燥に強いことが確認できた。同様の操作をコムギに対して行えば、同じように乾燥に強いコムギができるはずだが、シロイヌナズナでの成功をコムギに応用するのは容易なことではない。

遺伝子導入で光合成も効率化

岡本さんはその理由をこう説明する。「コムギ（パンコムギ）のゲノムサイズはイネの40倍、ヒトの5倍と非常に大きい上、3種類の植物の交雑から生まれたこともありゲノムの構成が複雑です。コムギゲノムの解読には13年を要して、ようやく完了したのは18年のことです。研究を開始した当時には、断片的なゲノム情報しか無く、地道にアブシシン酸受容体遺伝子を探すことから始めました」。

9種類のアブシシン酸受容体遺伝子を単離して、それらの特徴を調べていくと、どの受容体が最も耐乾性の向上に寄与するのかが予想できた。そこで、遺伝子組み換え技術でその受容体を多く作らせようとしたが、コムギへの遺伝子導入は、非常に難しいことが知られていた。日本国内で数人だけが可能な匠の技だったが、協力を得た岡本さんは受容体を多く持つコムギを生み出すことに成功した。このコムギを育てると、シロイヌナズナと同様に、期待通り乾燥に強くなることがわかった（図2）。

耐乾性コムギの開発には、耐乾性向上以外にも課題があった。シロイヌナズナを中心とした多くの先行研究では、耐乾性の向上と引き替えに生育阻害が起き、生産性が低下してしまうことが問題となっていた。気孔が閉じると水の蒸散は抑えられるが、同時に光合成に必要な二酸化炭素を取り込む量も減少するためだ。しかし、岡本さんが開発した耐乾性コムギでは、生育阻害は見られず、さらに乾燥条件で育てても種子の大きさが変わらなかった（図3）。

「効率的に光合成が行われているため、少ない水と二酸化炭素でも普通のコムギと同じように成長し、種子が収穫できると考えられます。なぜ、光合成が活発に行われるようになるのかは、今後の研究課題です」と岡本さん。

より少ない水で同じ収穫量が見込める岡本さんのコムギは、節水型の耐乾性コムギであるといえる。栽培に必要な水1リットル当たりの収量は、普通のコムギと比較して35パーセントも増加していた。

「第2の緑の革命」を起こせるか

今回開発された節水型耐乾性コムギは、遺伝子組み換えの技術を使っているため、安全であっても社会に受け入れられない可能性がある。そこで模索しているのが、遺伝子組み換えを使わない方法だ。

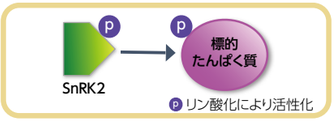
「アブシシン酸受容体を増やす遺伝子を持つ可能性がある野生のコムギをすでに見つけています。この野生種を使って、交配など従来の品種改良技術で節水型耐乾性コムギを作れるでしょう。ゲノムの解読によって効率的に品種改良が行えるようになったので、近い将来実現できると期待しています」と力を込める。現在は実用品種の作出に向け、ビニールハウス内で疑似乾燥区を作り、交配種の生育評価なども進めている。

1960年代から70年代にかけて穀物生産量の飛躍的な増加を可能にした「緑の革命」の要因の1つが、風の影響を受けにくく、種子が多く実っても倒れにくい草丈の低いコムギやイネの開発だった。少ない水で栽培できる乾燥に強いコムギの開発と普及は、乾燥地帯を世界の穀倉に変える「第2の緑の革命」になる可能性も秘めている。節水型耐乾性コムギの研究成果に今後も注目したい。

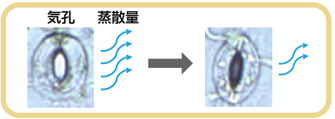
■図1　気孔が閉じる仕組み。アブシシン酸が直接、気孔を閉じるのではなく、複数の分子が関与する複雑な仕組みになっている。少量の植物ホルモンで、植物全体をコントロールするために必要な仕組みだと考えられている。

step1
環境ストレスによりアブシシン酸が生産され、受容体と結合する。

step2
アブシシン酸と結合した受容体が、PP2C酵素の働きを阻害する。PP2Cに阻害されていたSnRK2は自由になる。



step3
SnRK2酵素が活性化し、標的たんぱく質を活性化する。



step4
気孔が閉じる。

■図2
普通のコムギと耐乾性を高めたコムギの比較。普通のコムギ（左）では枯れてしまうほど少ない水の量で育てても、耐乾性を高めたコムギ（右）は枯れずに青々と茂っている。

■図3
収穫したコムギの比較。十分な水がある環境で育成した場合（上段）は、普通のコムギと耐乾性コムギの種子に大きな違いは見られない。しかし、乾燥条件では、普通コムギ（左下）が萎縮するのに対して、耐乾性コムギ（右下）ではあまり影響がないことがわかる。

＊Adapted by permission from Springer Nature customer service center GmbH: Springer Nature, Nature Climate Change, "Accelerated dryland expansion under climate chanege.", Huang et al.©2015

未来社会デザイン・オープンプラットフォーム（CHANCE）構想

開催報告

未来の食料問題の解決に挑む「ありたい『2050年の食卓』」を産官学民が議論

国連の推計によると、2050年には世界人口は98億人に達します。この急速な人口増加に伴う食料危機に学界や政策、産業界がどう応えていくのか、近年社会的関心が高まりを見せています。このテーマを共に考えるCHANCE構想の一環として、3月25日に人類の心もおなかも満たす「ありたい『食』の未来」の実現に取り組む産官学民のネットワーキング会を開催しました。

「2050年の食卓～CHANCEネットワーキング会～」当日の様子

「食」をテーマにした今回は、食品関連企業や投資家、人文社会学系・理工学系の研究者、行政機関などから約50人が参加しました。

上段左からネットワーキング会の共同企画者でファシリテーターの田瀬和夫代表取締役CEO（SDGパートナーズ）、竹内昌治教授（東京大学生産技術研究所）、日比野愛子准教授（弘前大学人文社会学部）、阿良田麻里子教授（立命館大学食マネジメント学部）、畝山寿之エグゼクティブプロフェッショナル（味の素グローバルコミュニケーション部）※所属は開催日時点。

ネットワーキング会の数日前に、未来社会創造事業においてサイコロステーキ状のウシ筋組織を作製することに世界で初めて成功したと発表した竹内教授。予見される食料不足や現在の食料生産システムの環境負荷を解決する策として培養肉の研究開発の重要性を述べました。新しい食の社会受容性を研究する日比野准教授は、人工物を自然または不自然とする感覚は文化や地域によって大きな違いがある点に言及しました。イスラム教徒の食選択の課題に詳しい阿良田教授も、ハラル認証（戒律にのっとった食であることを保証する）の難しさを例に消費者が自ら選べる情報提供を充実させる必要性を訴えました。食品メーカーで研究に取り組んできた畝山エグゼクティブプロフェッショナルも、「食」は身体や精神の安定だけでなく人との関係をつくるものであり、「おいしさ」は社会が持続する鍵であると指摘しました。

参加者との議論では「なぜ食べるのか」の問いかけから始まり、近年の社会変化が「孤食」など食生活の変化や、次世代の食卓が必要とする、栄養、食品としてのニーズを超えた「おいしさを共有する場」をどう支えるかを考える必要があること、また、発酵技術など日本の食文化の特徴には世界に新しく発信できる価値があるのではないかといった意見が交わされました。革新的な食は、誰がどのようにつくり、世の中に出ていくかも大きく影響することから、多角的な視点による対話を継続する必要性が共有されました。アンケートでは参加者の9割が「有益だった」と回答し、約6割から「現在または新たなビジネスや活動につながる議論ができた」との声が聞かれました。

ネットワーキング会から生まれた、学界、政策関係者、産業界をつなぐ顔の見える関係性から具体的なプロジェクトが生まれることが期待されます。

CHANCEとは

JSTは2018年から産業界や国、研究機関、民間などと共に未来の社会をデザインし、その実現に向けたシナリオを描く枠組み「未来社会デザイン・オープンプラットフォーム（CHANCE）」を立ち上げました。こうありたいという未来像をイメージし、それに向けてどのような基礎研究やサービス、社会システムが必要かを議論し、産官学民の協働の基盤をつくろうとするものです。社会課題の解決やありたい未来像への貢献を目指した研究開発の成果が、より良い形で世の中に出ていくよう、研究目標の設定（研究の入り口）や、研究成果の社会実装（出口）の過程で産官学民を超えた連携を進めています。

目指す姿

- SDGs達成、Society5.0実現への貢献
- 明るく活力に溢れた未来社会とそこに住む人類の幸福（well-being）に向けた「共創」

CHANCE※構想と賛同機関（2019年4月現在）
※CHAllenge-driveN Convergence Engine
https://chance-network.jp/index.html

ダイバーシティ推進

募集

第１回 輝く女性研究者賞（ジュン アシダ賞）募集中

JSTは多様な人材の活躍を推進する取り組みの1つとして、女性研究者を応援しています。

日本では研究者に占める女性の割合がいまだに低く、研究開発プログラムなどへの参画も少ない状況にあります。そこで、持続的な社会と未来に貢献する優れた研究などを行っている若手女性研究者、そして女性研究者の活躍を推進している機関を表彰する「輝く女性研究者賞（ジュン　アシダ賞）」を創設しました。ファッションデザイナーの故芦田淳氏が設立した芦田基金より、副賞が提供されます。

選考は、研究実績の他、人材育成、環境整備といった社会貢献などから総合的に判断されます。同時に、他機関のモデルとなるような機関を表彰することもこの賞の特徴です。

応募締切は6月30日（日）で、自薦・他薦とも受け付けています。受賞者の発表は10月上旬、表彰式はサイエンスアゴラ2019開催に合わせて11月16日（土）または17日（日）を予定しています。

選考委員

輝く女性研究者賞（ジュン アシダ賞）フライヤー。赤い服を着た女性が交差点を歩く様子が描かれています。その道に光を当てることで、女性研究者の進む先が明るい未来になるようにとの願いを表しています。

輝く女性研究者賞（ジュン アシダ賞）
https://www.jst.go.jp/diversity/about/award/index.html

日本科学未来館

開催報告

未来のコミュニケーションをデザインしたい若きビジョナリーたちの挑戦が始まる

新しいビジョンを描く力、多種多様な人との共創によって起こるイノベーションに注目し、若い才能を発掘、支援するプロジェクト「未来館ビジョナリーキャンプ」が日本科学未来館（東京・お台場）で3月の3日間行われました。

「2030年のコミュニケーション」をテーマに、未来のコミュニケーションがどうあってほしいか、実現するにはどんな方法があるかを、「ビジョナリー」＝「未来へのビジョンを持ち、実現に向けて周囲を巻き込み、自ら行動できる人」として集まった15～26歳の若者たちが、研究者やクリエイター、エンジニアたちと熱く語り合いました。

37人のビジョナリーたちは、自分が考えるコミュニケーションの問題とその解決へ向けたビジョンの共有を通してチームを結成し、実現したい未来を発表しました。

優秀チームは3チーム。そのうち「チーム家族」は、2030年でも人間同士のコミュニケーションはなくならないが、家族の形は今より多様化していると予想しました。そこで足音など家族の気配をデータ化し、物理的な距離を越えて家族のぬくもりを感じられるアイデア「オーダーメイドメディア」を提案しました。

3チームは今後、研究者やクリエイター、未来館のサポートを受けながらアイデアを形にし、今年10月より日本科学未来館の常設展示として1年間公開します。プロジェクトを通して共に未来を創る挑戦が始まっています。

「チーム家族」発表の様子

さきがける 科学人

vol.86

オンリーワンの実力が共に歩む仲間をつくる

東京理科大学 工学部 准教授

田中 優実
Yumi Tanaka

Profile

静岡県出身。2003年 東京大学大学院工学系研究科博士課程単位取得満期退学。博士（工学）。旭化成やJSTさきがけ研究員、東京医科歯科大学助教、九州大学大学院工学研究院准教授を経て、13年より現職。15年よりCREST主たる共同研究者。

Q1 印象に残っている言葉は？

A1

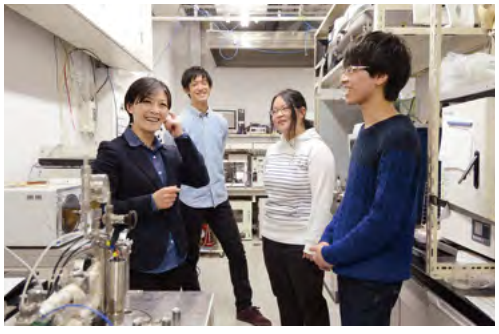
1つの研究テーマを担っている以上、学生であっても「これに関しては誰にも負けない」というプロ意識と責任を持て

学生時代に当時助手だった先生に言われました。きっかけはどうあれ、研究テーマを選んだのは自分自身だから、そのテーマに関しては自分がオンリーワンだという意識を持ち、真摯に研究と向き合いなさいと。これをアレンジして、学生にはよく「テーマを愛せ」と言っています。研究テーマに注力するためには愛や情熱が必要です。それらがあって初めて研究が楽しくなり、成果につながります。研究を続けていると自分の力だけでは解決できないことがあります。こうした時に他の研究者の力を借りるには、自分の研究テーマで相手に認められるだけの実力が求められます。そのためにも若いうちから自分を磨くことが大切だと思います。

Q2 研究者を目指したきっかけは？

A2 未知の事象を論理的に突き詰めたいから

子供の頃から実験が大好きでした。夏休みの自由研究で紫キャベツを使ってpH試験紙を作製したり、酸素吸収剤を使って光合成の実態を確かめようとしたりしていました。その後、推理小説に夢中になり一度は文系を選択したのですが、ものづくりや実験に携わりたいという思いが強くなって、高校3年生の時に思い切って理系に転向しました。



研究者になろうと決めたきっかけは、大学の学生実習で化学の面白さを再認識したからです。研究室に配属されてからは、未知の事象に対するアプローチを自分で実際に計画し実行していく過程が非常に興味深く、論理的に物事を突き詰めることが好きな私に向いていると改めて感じました。

研究だけでなく、インテリアやコーヒーも突き詰めています。おいしいコーヒーを求めてあちこちのカフェを訪れてはそれぞれのお店でシングルオリジンコーヒーを試して、味について脳内で分析することを楽しんでいます。

Q3 研究テーマを一言でいうと？

A3 イオンの動きを制御して高い発電効率を生み出す

現在の研究テーマの1つは、静電気を利用した振動発電です。これは身の回りにあるわずかなエネルギーを電力に変換し活用する技術の1つで、IoT社会の発展には不可欠です。イオン伝導性セラミックスを基材として多くの電荷を半永久的に保持できるエレクトレットを開発し、高い発電効率を実現することを目指しています。イオン伝導性セラミックスというのは、固体内でイオンが移動する性質を持つ材料です。この性質を利用して固体内に分極状態を誘起し、固定化するという独自のやり方で、±4キロボルト超の表面電位を持つエレクトレットを作り出すことに成功しました。さらなる高性能化はもちろん、デバイス化に向けて、これからますます研究を加速させていくつもりです。自分のアイデアが世の中に役立つものとして形になれば最高ですね。

リサイクル適性Ⓐ
この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。
R70 古紙パルプ配合率70％再生紙を使用

JSTnews
June 2019

発行日／令和元年6月10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 東京都千代田区四番町5-3サイエンスプラザ
電話／03-5214-8404　FAX／03-5214-8432
E-mail／jstnews@jst.go.jp　JSTnews／https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/

最新号・バックナンバー