

# JST news

未来をひらく科学技術

特集

## スマート社会をけん引する フォトニック結晶レーザー

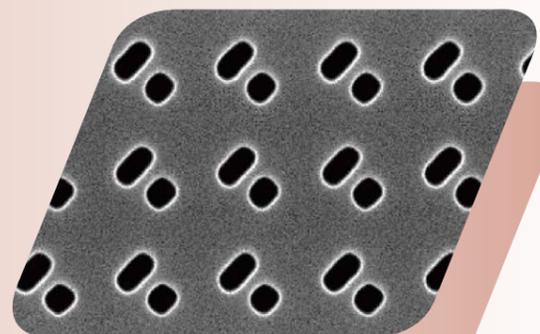
# 11

November  
2020



特集

03 スマート社会をけん引する  
フォトニック結晶レーザー



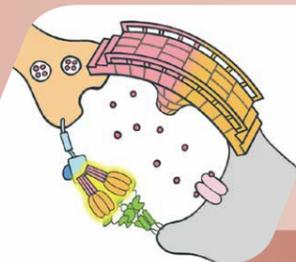
世界を変える STORY

06 接ぎ木が育む次世代の農と食  
植物の無限大の可能性を世界へ



NEWS & TOPICS

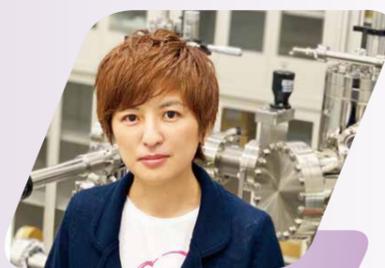
08 途切れた神経回路を再形成  
脊髄損傷のマウスが回復



さきがける科学人

12 科学は人類の財産、未来への希望

理化学研究所 開拓研究本部  
研究員 数間 恵弥子



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：株式会社伝創社  
印刷・製本：株式会社丸井工文社

特集

スマート社会をけん引する  
フォトニック結晶レーザー



のだ すむ  
野田 進

京都大学 大学院工学研究科 教授  
2000年よりCREST研究代表者  
(2000~05年,05~10年,11~16年,17年~現在)、  
13~18年 ACCEL研究代表者

光を自在に制御する「フォトニック結晶」。スマートモビリティを始めとするSociety 5.0を実現するための鍵となる技術の1つとして、近年フォトニック結晶レーザーは大きく発展を遂げている。これまで20年に及ぶ研究に取り組んできた京都大学大学院工学研究科の野田進教授の歩みを振り返る。

実用に近づく自動運転車  
課題はセンサーの性能向上

自律移動ロボットや自動運転車はいまや実用間近の段階まで開発が進んでいる。しかし実用化に当たっての課題はいくつか残されており、「ライダー(Light Detection and Ranging: LiDAR)」の性能向上もその1つだ。

ライダーはリモートセンサーの一種で、レーザー光を物体に照射し跳ね返ってくるまでの時間を計ることで、物体までの距離を測定する装置だ。周囲の状況を常に把握しながら動く自律移動ロボットや自動運転車にとっては、「目」の役割を果たすライダー。この性能が上がれば、より安全でスムーズな移動が可能になることから、近年開発競争が活発になっている。

これまでライダーの光源には半導体レーザーが用いられているが、小型、安価で扱いやすいものの、高出力にするとレーザー光が広がり性能が下がるため、複数のレンズを組み合わせるなど、装置の大型化、高コスト化が問題となっていた。

2020年6月、京都大学大学院工学研究科の野田進教授は、北陽電機(大阪府大阪市)と共同で「フォトニック結晶レーザー」を使った高性能なライダーを開発した。野田さんはフォトニック結晶の第一人者で、約20年にわたって研究開発を進め「フォトニック結晶工学」という新たな科学技術分野の礎を築いてきた。今回発表したフォトニック結晶レーザーは、その集大成の1つとも呼べるものだ。

フォトニック結晶レーザーで広がるSociety 5.0



周期構造で光を制御  
自然界にも同じ原理

フォトニック結晶とは、光の波長と同程度の数百ナノメートル(ナノは10億分の1)の間隔で、屈折率の異なる物質を周期的に並べた人工結晶である(図1)。エレクトロニクス分野において、半導体が電子の振る舞いを精密に制御しているのと同様に、光の振る舞いを自由自在に制御するのが特徴だ。

フォトニック結晶は光の波長と同程度の間隔の周期構造を持ち、その中では、ある範囲の波長の光を通さない「フォトニックバンドギャップ現象」が起こる。

自然界にも同じ原理のものが多くあり、モルフォチョウやタマムシ、オパールも表面に微細な周期構造を持っているので、構造色と呼ばれる独特な光沢を発する。

屈折率の異なる物質を周期的に並べるには、結晶に孔を開ける方法がある。孔と孔との間隔や位置、孔の大きさ、形を工夫することで、光の振る舞いを制御できる。「結晶の母材として、現在、ガリウムヒ素などの半導体材料を用いています。それは、これら半導体材料は、様々なデバイスへの展開にとって非常に有用な材料だからです」と野田さんは語る。

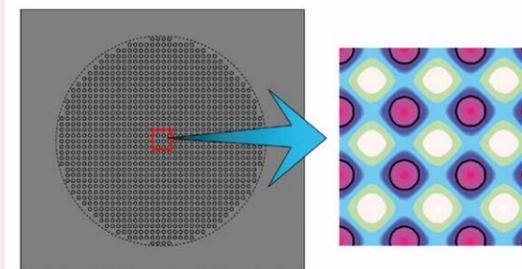


図1 フォトニック結晶。半導体材料に小さな孔が周期的に開けられている(左)。フォトニック結晶により制御された電磁界分布(法面垂直方向の磁界成分)が示されている。ピンク色、白色は、それぞれ磁界が逆向きを向いていることを示す(右)。

## 二重格子にすることで 高出力、直進発振を実現

1999年、野田さんはバンドギャップができるぎりぎりのところに現れるバンド端で、大面積の共振状態が現れることに着目し、この共振状態を半導体レーザーの共振器として用いるという着想に至った。実際にフォトニック結晶を集積し、この共振状態を活用したフォトニック結晶レーザーを作り、動作させた。すると期待通りに大面積できれいな発振が得られ、さらに出力光が面垂直方向に真っすぐ出射された。以来、野田さんはフォトニック結晶レーザーの物理の解明とともに、特性向上に努めてきた。その結果、ライダーの小型軽量化、低コスト化に加え、高出力化、安定化にもつながり、現在大きな期待が寄せられている。

その中でも、特に重要なブレイクスルーは、フォトニック結晶の周期構造を二重格子にすることだった。従来は周期点1つ当たり1つだった孔を2つにし、それぞれの孔の高さを変えたのだ(図2)。「二重格子の発想自体は随分前に思い付いたのですが、当時はまだ理論的な計算ができていませんでしたし、これだけ細かなフォトニック結晶を正確に作る技術もありませんでした」と野田さんは振り返る。この二重格子フォトニック結晶では、それぞれの格子で回折される光波同士で打ち消し合いの干渉が起こり、光分布が広が

る。その結果、基本モードのみで動作し、高品質なレーザー光を出すことが可能となるのがわかり、直径500マイクロメートルという従来の半導体レーザーの1万倍以上の面積で、10ワット級の高出力、高品質なレーザーの開発につながった。

さらに、2つの孔の組み合わせを変えることで孔の高さをそろえることにも成功し、製作工程を短縮できた他、下方への放射光も有効利用し、高効率化を図った(図3)。まさに、綿密な計算による理論の裏付けと微細加工技術の蓄積によって得られた成果といえる。

こうして開発したフォトニック結晶レーザーと従来の半導体レーザーを実際に比べてところ、レンズによる補正がない半導体レーザーではレーザー光がどんどん広がってしまうのに対し、フォトニック結晶レーザーでは、レンズがなくても約30メートル先までレーザー光がほとんど広がることなく届いた(図4)。「実験によって、ロボットの自動走行に適用するのに十分な性能があることが実証されました。その

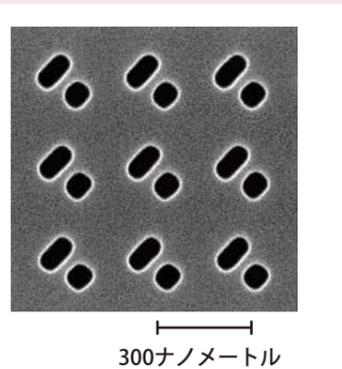


図3 2つの孔の大きさを適切に変化したフォトニック結晶では、180度方向の消失性干渉を強めつつ、面垂直光放射を確保できる。また、1回のプロセスで作製できる利点もある。

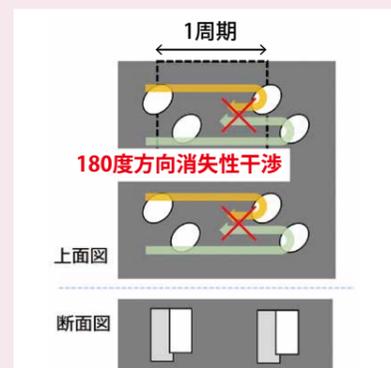


図2 同じ大きさで、異なる高さの孔を2つずつ並べたフォトニック結晶の模式図。孔を二重格子にし、精密な計算に基づいて2つの孔の高さを適切に変えることで、広がらず、高出力のレーザー光を発振することに成功した。

結果、ライダーの小型軽量化、低コスト化、高出力化、安定化が可能となり、従来の半導体レーザーの問題の大部分を克服できました」と野田さんは胸を張る。

## 2次元でビーム走査 物体の検知を高精度に

続いて、野田さんは電氣的にビームの出射をさまざまな方向に制御できる「複合変調フォトニック結晶レーザーチップ」の開発にも成功した。また、静岡大学発ベンチャー企業のブルックマンテクノロジー(静岡県浜松市)と共同でこのレーザーチップを使い、フラッシュ方式とビーム走査方式の併用による新たな非機械式のライダーも開発した。

従来のライダーは、レーザー光を反射するミラーの角度を変えることで、広範囲を走査している(図5)。これに対し、すでに1次元方向へのビーム走査技術の開発に成功していた野田さんは、それをさらに進展させ、2次元でのビーム走査によって、ミラーを搭載することなく電氣的にさまざまな角度にレーザー光を当てられるようにした。基本となるフォトニック結晶では、等間隔で同じ形と大きさの孔を並べているが、複合変調フォトニック結晶では孔の位置と大きさの両方を変えて、任意の方向へと光を放射できるようにしている(図6)。

この技術の開発に当たっても苦労があった。「初めは孔の位置だけ変えればよいと思っていました。ところがなぜか出力が大きくなりません。実験を繰り返すうちに、電界の打ち消し合いに

	15cm	50cm	1m	10m	20m	30m
通常のブロードエリア半導体レーザー				確認できず	確認できず	確認できず
フォトニック結晶レーザー						

図4 従来の半導体レーザーとフォトニック結晶レーザーとの比較。直径500マイクロメートルという大面積のフォトニック結晶レーザーでは、約30メートル先まで光がほとんど広がることなく届く。

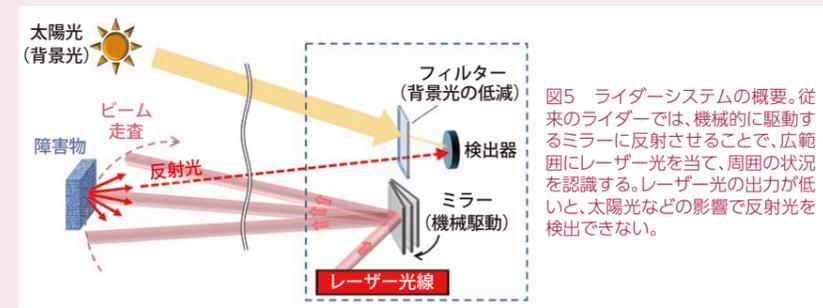


図5 ライダーシステムの概要。従来のライダーでは、機械的に駆動するミラーに反射させることで、広範囲にレーザー光を当て、周囲の状況を認識する。レーザー光の出力が低いと、太陽光などの影響で反射光を検出できない。

よって光が放射されないことに気付きました」と野田さんは振り返る。そして孔の位置を変えて打ち消し合いを崩すことで、高出力かつ高品質なビームを実現したのだ。

この複合変調フォトニック結晶を使って100個のレーザーを集積したチップを作製し、10×10個のマトリクスアレイ構造を持つ複合変調フォトニック結晶レーザーを開発した(図7)。このレーザーでは、10×10の行列の行と列を指定し電気を流すことで、その場所のチップのみからレーザー光を発振させる。それぞれのチップによって発振されるレーザー光の方向が異なるため、電氣的に制御することで、レーザー光を使って2次元走査ができるという仕組みだ。これにより、1つ数ワットのレーザー光を4つ同時に、別々の方向に出すことができるようになった。

さらに、チップ面積を4倍にするだけで、ビームの出射数を現在の900倍の9万個にできることもわかり、周囲の物体をより高精度で検知できるようになるという。野田さんは「特に、従来のフラッシュ方式のみのライダーでは計測が難しかった黒い物体も、このチップを使ったビーム走査方式を併用することで、レーザー光を集中的に当てて距離を測れるようになります」とメリットを語る。

## JSTと共に歩んできた20年 光るリーダーシップ

フォトニック結晶の研究開発を野田さんが始めたのは1990年代のことだった。そして、2000年からおよそ20年にわたり、JSTのプログラムで研究を続けている。

この間の成果は枚挙にいとまがない。00年、05年とCRESTに採択され、当時はまだ萌芽の段階だったフォトニック結晶による光の発生、制御に取り組み、その基礎を築いた。その中で、野田さんはフォトニック結晶レーザー技術を大きく発展させていった。また東日本大震災の直後で自然エネルギーの活用が叫ばれていた11年からは、フォトニック結晶レーザーとは逆に、フォトニック結晶の周期構造を工夫することで幅広い波長の光を吸収できるようにし、シリコン太陽電池のエネルギー変換効率を高めることに成功した。

また、13年からはACCELで三菱電機(東京都千代田区)、ローム(京都府京都市)、浜松ホトニクス(静岡県浜松市)といった企業と連携し、フォトニック結晶レーザーの実用化を目指す研究開発に取り組んだ。野田さんが複合変調フォトニック結晶レーザーの概念を思い付いたのはこの頃のことだ。「自動運転車の研究開発が盛り上がりを見せ始めていた時期だったため、現

在のCRESTで、変調フォトニック結晶レーザーによる2次元ビーム走査技術の開発に取り組むことになったのです。さらに、幸いにも省庁連携型のSIPプロジェクトにも採択され、CRESTと共同して社会実装を強力に押し進める体制が整いました」。

これらの成果を語る上で、野田さんのリーダーシップも見逃せない。「研究を進めるに当たっては、研究室でもプロジェクトチームでも、ミーティングをしっかりとって、各人の考えを尊重しつつ、チームとしての方向性を統一しながら進めてきました。得意分野の異なる人が交流し、知恵を出し合うことで、1+1を3にすることができます」と語る野田さんの方針は、未来を担う若い研究人材の育成も考慮したものだ。また、装置の開発に携わる企業との細やかなコミュニケーションは、技術力の向上にもつながっている。

今後は、まず企業と共同でフォトニック結晶レーザーを搭載したライダーの1日も早い実用化を目指すという。また、レーザーの連続動作や輝度の向上を実現し、従来の炭酸ガスレーザーなどに替わる超小型の加工レーザーの開発も計画している。「将来は、全てのレーザーがフォトニック結晶レーザーに替わることを夢見ています」と語る野田さん。自らの成果がスマート社会 Society 5.0を支える基盤技術となる日を目指し、これからも仲間と共にまい進していく。

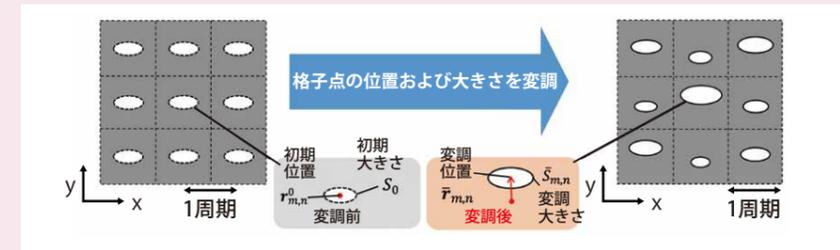


図6 格子点の位置および大きさを変調し、高出力のレーザー光を狙った方向に出すことができる。

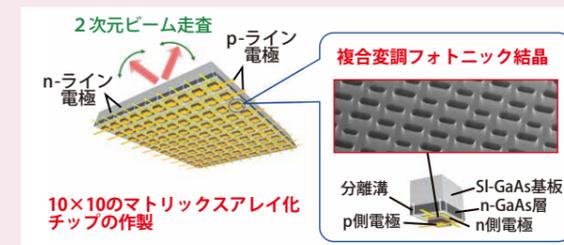


図7 複合変調フォトニック結晶を使い100個のチップを作製し、10×10個のマトリクスアレイ構造を持つ複合変調フォトニック結晶レーザーを開発した。

# 世界を変える STORY vol.8 GRA&GREEN

## 接ぎ木が育む次世代の農と食 植物の無限大の可能性を世界へ

下の根と葉はキク科のキク、上の葉と花はナス科のトマト。不可能とされてきた異科間の接ぎ木技術の事業化で注目を集めるのが、名古屋大学発ベンチャー企業のGRA&GREEN(愛知県名古屋市)だ。独自の先端技術で植物の秘めた能力を引き出し、種苗分野から真に持続可能な農業と食の創造に挑む。

### 常識を覆した偶然の発見 タバコ属で遠縁をつなぐ

古くから培われてきた農業手法である「接ぎ木」。病気や塩害に強い根を持つ植物(台木)に、味が良く収量が高い植物の葉や茎(穂木)を接ぐと、両方の長所を併せ持つ個体が得られる。野菜や果物を安定して生産できるので広く普及しているが、異なる科の植物では拒絶反応が起こるため、近縁の植物間に限られてきた。

その常識を覆したのが野田口さんだ。タバコ属の植物を介せば遠縁の植物でも接ぎ木できることを2013年に発見した。「葉で起こった現象がどのように根へ伝わるのかなど、植物体内の情報伝達を検証するために接ぎ木をしていました。研究室のいろいろな植物を試していたところ、モデル植物であるペンサミアナタバコで、ナス科とアブラナ科を接ぎ木することに偶然成功したのです」。

タバコ属の植物を利用して科が異なる

植物を接ぎ木する技術を「異科接木技術(iPAG)」と野田口さんは名付けた。「この技術を農業の現場に活用できないか」と起業を目指して実用化研究を開始し、京都大学農学部で同じ研究室だった後輩の丹羽さんと一緒に駆け出した。幼少の頃、丹羽さんは「農業を研究して社会に役立てたい」という思いを抱き、研究者を志した。当時は京都大学の助教になって1年目で、研究者への道を歩み出したばかりだった。「野田口さんの話を聞いて、その日のうちに研究チームへの参画を決断しました。新しい価値をもたらすと確信できる研究でしたから」と丹羽さんは力強く語る。

大学などで生み出された技術シーズの事業化を支援するSTARTプログラムには15年に採択された。「事業化の計画を立てるために必要となる市場の規模や性質の調査分析など、大学で研究してきた私たちにとっては重要な支援で、十分に起業の準備ができました」と野田口さんは振り返る。

STARTの最終年度となる17年、丹羽

さんと野田口さんはGRA&GREENを共同創業した。当初は事業家もチームに入れる予定だったが、農業分野で最先端技術を事業化させた経験を持つ人材が見つからず、「それならば自分がビジネス面を担いたい」と丹羽さんが手を挙げた。ベンチャー企業の舵取りは初めてだったが、全く迷いはなかったという。

### 迅速で自由自在な品種改良 ゲノム編集やMEMSも応用

農家の労働力不足を背景に、効率良く生産性を上げる接ぎ木苗の需要は高まっている。「日本で年間5億本、世界で見ると100億本で、国内外を合わせると7000億円の市場規模」と丹羽さんは説明する。しかし接ぎ木苗の多くは手作業で生産されており、供給が需要に追いついていない。GRA&GREENは、新しい品種を作るための技術開発と、接ぎ木苗の生産システム開発の2つを事業展開の柱に据えた。

人工交配や遺伝子組み換えによる品種

改良は十年単位の時間と労力がかかる。「既存の植物を利用する接ぎ木技術を活用すれば、企画から商品化まで最短2年です。iPAG技術が実用化されれば、自由自在に新しい種苗を作り出すことができます」と丹羽さん。より短期間で安価な品種改良を目指し、iPAGを応用したゲノム編集技術ツールの開発も進めている。接ぎ木した個体では、水や栄養だけでなく、RNAも台木から穂木へと送られる点に着目した。タバコ属植物にゲノム編集ツール自体を作らせ、接ぎ木を介して標的作物に送り込み、標的作物が種を作る前に遺伝子を編集し、目的の性質を持つ作物に改良する仕組みだ。

接ぎ木は双葉が開いた段階で行うが、トマトの双葉の茎の直径はわずか2ミリメートルで、熟練者の経験と技が求められる作業である。「モデル植物のシロイヌナズナの場合、発芽して間もない茎の直径は0.2ミリメートルほどです。顕微鏡で観察しながら接ぎ木するのは実に困難です」と野田口さんは語る。そこで台木と穂木を接いだ状態で固定できる「接木チップ®」を開発した(図1)。微細加工技術(MEMS)に基づき設計され、植物の成長に合わせてマイクロチップの樹脂が変形するため安定して作業できる。



図1 接木チップ上では、マイクロ通路に並ぶマイクロピラーが台木と穂木の位置を保ち、安定した接ぎ木を可能にする。



図2 接木カセットで台木と穂木の接合面に圧力をかけ、接ぎ木を行う装置と組み合わせる。

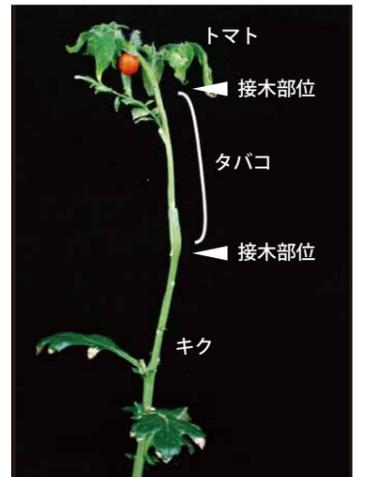


図3 細胞の癒合を促し「接着剤」として働く酵素を特定し、キク科のキクを台木に、タバコ属植物を介して、ナス科のトマトを接ぎ木することに成功した。

接木チップは研究ツールとして開発した。接木チップによって、2000年以上の歴史がありながら、まだ十分に解明されていない接ぎ木メカニズムの研究が進展することを期待している。接木チップを育苗に転用したのが、今年7月に販売を開始した「接木カセット®」である(図2)。接木カセットを用いることで、熟練者でなくとも1時間当たり約250本の接ぎ木苗を生産できる。将来は接木カセットを接ぎ木装置に組み込むことで、手作業の8倍の速さを実現し、接ぎ木を自動化することを目指す。

乾燥や塩分に強い植物を台木にすれば、砂漠や塩害地など、農業に適していない土地でも食糧を生産できるでしょう」と野田口さんは期待を込める。「例えば高原野菜の圃場は高度が上昇して、もはや圃場を移動させるだけでは対応できません」と丹羽さんが続ける。「野菜自身を暑さに強くするなど、作物の能力を上げていくことが求められます。環境の劇的な変化にいかに対応していくか、GRA&GREENの技術の見せ所です」。生産費用や労力がかかる地場野菜も育てやすく品質改良すれば、地域の伝統的な農産物や食を守ることにもつながっていく。

### 乾燥や塩分に強い台木 農業不適地でも食糧生産を

地球規模の気候変動や人口増加、耕作適地の減少により、世界では安定した食糧生産が難しくなっている。iPAGを

はじめとした接ぎ木技術を発展させて、乾燥や塩分に強い植物を台木にすれば、砂漠や塩害地など、農業に適していない土地でも食糧を生産できるでしょう」と野田口さんは期待を込める。

「例えば高原野菜の圃場は高度が上昇して、もはや圃場を移動させるだけでは対応できません」と丹羽さんが続ける。「野菜自身を暑さに強くするなど、作物の能力を上げていくことが求められます。環境の劇的な変化にいかに対応していくか、GRA&GREENの技術の見せ所です」。生産費用や労力がかかる地場野菜も育てやすく品質改良すれば、地域の伝統的な農産物や食を守ることにもつながっていく。

「偉大な植物」とも読める社名は、接ぎ木を意味する「グラフト」と植物の「グリーン」を「アンド」で接いだ。「植物の無限大の可能性を先端技術で最大限に引き出し、世界へ幸せを届けたい」という創業の思いを原点に、GRA&GREENは新たな食糧の未来を描き出そうとしている。

## HISTORY

### 2013年

留学中、モデル植物であるタバコに接ぎ木したところ、遠縁の植物とつながることに成功。

### 2016年

野田口さんが丹羽さんと学会で再会。iPAGの実用化を目指し研究チームを結成。

### 2017年

GRA&GREEN設立。



(写真は現在のメンバー)



開発した技術への期待、業界での位置付けを冷静に見極めることが成果につながっていきます。

### 2020年

4月に接木チップ開発、7月には接木カセットの販売開始、8月には接着剤として働くタバコ属の酵素の発見(図3)など、次々に成果を発表。



### ~2022年

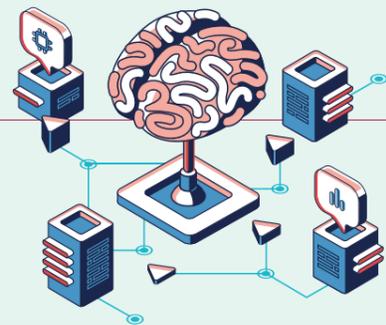
全く新しい形質を持つ種苗を2022年までに上市することを目指し、チーム一丸となって研究開発中。

先端技術の事業化には、苗業者や農家と連携して、技術が使われる現場を理解するローカルな視点が必要です。





戦略的創造研究推進事業  
CREST「光操作によるシナプス可塑性と記憶形成の因果関係の解明」  
ERATO「浜地ニューロ分子技術プロジェクト」



## 途切れた神経回路を再形成 脊髄損傷のマウスが回復

掛け算の九九を暗記できたこと、一輪車に乗れるようになったこと。学習した事柄を記憶したり、練習を繰り返して運動が上達したりするのは、数百億もの神経細胞をシナプスがつなぎ合わせ、複雑かつ整然とした神経回路を介して脳内に情報を伝えているからです。

神経の疾患や損傷によってシナプスが壊れると情報伝達は損なわれますが、正常な機能を取り戻そうにも、シナプスの種類は膨大で、狙い通りの組み合わせでつなぐことは困難です。慶應義塾大学医学部の柚崎通介教授と鈴木邦道助教らは、壊れたシナプスをつなぎ直す人工たんぱく質CPTXを開発し、途切れた神経回路の再形成と病態の回復に成功しました。

神経細胞はシナプス前部から神経伝達物質を放出し、後部の神経細胞が

受容することで情報を伝えていきます。2010年、柚崎教授らは主に小脳でシナプスの前部と後部を強力につなぎ合わせ、シナプス形成を促進するペプチドを発見しました。このペプチドを脳内の他の神経回路でも動くように構造を改変したものがCPTXです。神経細胞を活性化させる興奮性シナプスの後部に存在するグルタミン酸受容体(GluA)と結合する機能を持たせました(図1)。

CPTXがシナプスを接続する機能を検証するため、シナプスの異常に起因する病態のモデルマウスに投与しました(図2)。小脳失調、アルツハイマー病、脊髄損傷は、それぞれ小脳、海馬、脊髄と3つの異なる中枢神経系でシナプスの機能や数が失われ、学習や運動に影響を及ぼします。

小脳失調により歩幅が不安定だっ

たマウスに投与すると、バランスを取って歩けるようになりました。アルツハイマー病のマウスは、罰を受けた場所や餌のある場所への最短経路を覚えられませんが、CPTXを注射して3~5日目には記憶力の改善を確認できました。脊髄損傷のマウスは、投与後1週間で後ろ足のまひが改善して動かせるようになり、1回の投与で少なくとも8週間にわたって効果が持続しました。

柚崎教授らの成果は、シナプスの形成メカニズムや精神・神経疾患の病態の解明だけでなく、シナプス形成に着目した新たな治療法に道を拓きました。「動物実験によって、より有効な投与方法の検討を進めるとともに安全性についても確認し、治療薬の開発につなげていきたい」と、柚崎教授は臨床応用への意気込みを語ります。

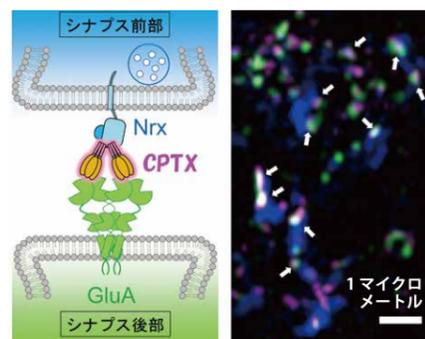


図1 CPTXは、シナプス前部で神経伝達物質を放出するニューレキシン(Nrx)と、後部のGluAの橋渡しをして、シナプスを形成する。右の超解像度顕微鏡像は、脊髄損傷マウスでCPTX(ピンク)がシナプス前部(青)と後部(緑)を結合する様子。

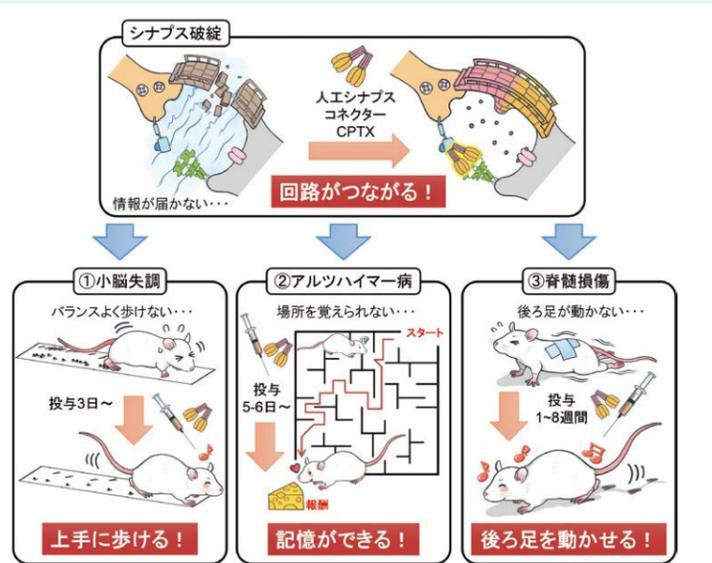


図2 小脳失調、アルツハイマー病、脊髄損傷のモデルマウスにCPTXを投与すると、いずれも3日から1週間で症状が改善した。



EIG CONCERT-Japan 研究課題「持続的な作物生産のためのジャガイモとキャッサバの比較オミックス解析」  
e-ASIA共同研究プログラム 研究課題「最先端科学技術を用いたアジアにおけるキャッサバ分子育種の推進」  
地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム(SATREPS)  
研究課題「ベトナム、カンボジア、タイにおけるキャッサバの侵入病害虫対策に基づく持続的生産システムの開発と普及」

## キャッサバの塊根形成の仕組みを解明 第四の炭水化物、持続的な生産に道筋

ぶるっ、もちっとした独特な食感がたまらないタピオカ。その原材料はキャッサバのでんぷんです。キャッサバは痩せた土地でも栽培しやすく、塊根の中で作られるでんぷんは、熱帯地域など世界中で約10億人の食糧源やエネルギー源として暮らしを支えています(図1)。

三大穀物のイネ、トウモロコシ、コムギに次ぐ第四の炭水化物として、食糧や産業利用でも重要視されているキャッサバを持続的に生産するため、理化学研究所環境資源科学研究センターの関原明チームリーダー、内海好規研究員らの国際共同研究グループは、塊根が形成される分子メカニズムを解明しました。

実験ではタイの圃場で栽培されたキャッサバを使いました。キャッサバを塊根になる前の根、直径5ミリメートル未満、および5ミリ以上の3種類に分け、塊根はさらに樹皮と柔組織に分けていきます。それぞれについて生体内に存在する分子の植物ホルモン、代謝物、転写物を網羅的に調べられる解析技術を用いて比較しました。キャッサバは、挿し木後から4週間ごとに12週になるまで採取しました。

塊根中のでんぷん含有量を調べた結果、挿し木後8週目と12週目全てのサンプルででんぷん代謝の基質となる糖類が増加し、塊根の直径の大小にかかわらずでんぷんの合成が活性化されていました。塊根と塊根になる前の根の遺伝子発現を比較したところ、糖類の増加に伴って、代謝に関わる遺伝子発現量が増加していることも明らかになりました。さらに植物ホルモン分



図1 キャッサバは茎を挿してから1年で約2メートルにまで成長する。葉は食用や飼料など、茎は繁殖に利用され、塊根は食糧になる。

析の結果、塊根形成過程で植物の成長促進や老化の抑制などに関与するサイトカイニンが増加していることやアスパラギン酸結合型オーキシンが減少していることがわかりました。

この結果から塊根の形成は植物ホルモンによって制御されていると考えられ、植物ホルモンと根の肥大の関係性を調べるため、キャッサバを無菌栽培の実験系で植物ホルモン処理しました(図2)。すると、植物の成長や形態形成などの役割を担うオーキシンとサイトカイニンで処理した場合は組織培養の根が肥大したのに対し、人工サイトカイニンの6-ベンジル

アミノプリン(BAP)と人工オーキシンのナフタレン酢酸(NAA)が存在する状態でジャスモン酸またはアブシジン酸で処理すると根の肥大が阻害されました。また、NAA存在下でアスパラギン酸結合型オーキシン処理した場合も、根の肥大が阻害されました。

「根から塊根への変化を遺伝子発現、代謝物、ホルモンの解析技術により可視化し、さらに塊根形成で重要な役割を果たす植物ホルモンの相互作用を解明できました。今後さらに詳細な仕組みを調べていく必要がありますが、環境負荷を低減しながら十分な収量を維持できるキャッサバの栽培法や植物の設計に貢献したい」と関チームリーダーは語ります。効率的な塊根の収量増産に向けた技術が開発できれば、豊かな暮らしを守る大きな一歩になります。



図2 無菌栽培の実験系による塊根の形成実験。キャッサバの根にそれぞれ0.5マイクロモラーずつBAPとNAAで処理すると無処理(下)に比べて根が肥大した(上)。

# 充電電圧が上昇する原因を特定 リチウム空気電池の実用化へ前進

スマートフォンやパソコンに内蔵され、今や暮らしに欠かせないリチウムイオン電池。その数倍ものエネルギー密度があるとされ、次世代蓄電池の候補の1つとして注目されているのがリチウム空気電池です。負極にリチウム金属が使われ、カーボン正極上で空気中の酸素を反応させます。軽さが求められるドローンやIoT機器、電気自動車など、幅広い用途が期待されています。

しかし、リチウム空気電池は充放電できる回数が数十回程度にとどまっており、実用化には至っていません。充電電圧が上昇して副反応を誘発し、充放電サイクル寿命が低下すると考え

られますが、その原因は特定できていませんでした。

物質・材料研究機構NIMS-SoftBank先端技術開発センターの久保佳実アドバイザーらの研究チームは、リチウム空気電池の充電電圧が電池の部材や測定状態によって微妙に変化することに着目しました。充電電圧と種々の因子との関係を調べたところ、放電生成物である過酸化リチウム(Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)の結晶性が高いほど充電電圧が上がってしまうことが判明しました(図1)。

まず、正極材の高導電性カーボンブラックを、還元処理、未処理、酸化処理で比べたところ、還元処理したものは充電電圧が上がり、酸化処理では下

がりました。次に、放電で生じた過酸化リチウムのX線回折強度は、還元処理では高く、酸化処理では低くなっていました。充電電圧が低いものほど過酸化リチウムの結晶性が低いことを示す結果です(図2)。放電後にカーボン正極の表面を走査電子顕微鏡で見ると、正極の処理条件によって過酸化リチウムの結晶性が異なるのがわかります(図3)。放電時の電流密度や電解液中の水分量などを変えた場合にも、過酸化リチウムの結晶性と充電電圧との同じような関係が観察されており、普遍的な傾向だと考えられます。

研究チームは今後、低結晶性の過酸化リチウムを優先的に生成して充電電圧の上昇を避ける手法の確立に向けて研究を進めていきます。サイクル寿命を延ばすことができれば、「究極の二次電池」と呼ばれるリチウム空気電池の実用化へと大きく前進することでしょう。

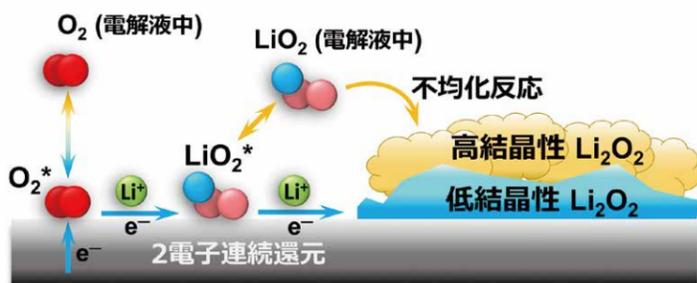


図1 リチウム空気電池の放電過程におけるカーボン電極表面の様子。生成する過酸化リチウム(Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)の結晶性が高いほど充電電圧が上昇する。

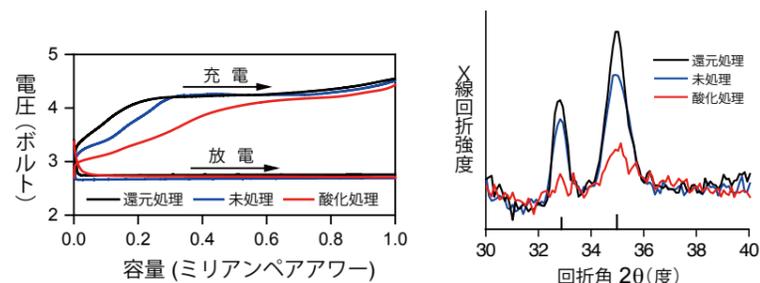


図2 カーボン正極の処理条件による充放電特性(左)と放電後のX線回折強度(右)。正極材の表面を酸化処理すると、生成する過酸化リチウムの結晶性ととも充電電圧も低くなること示された。

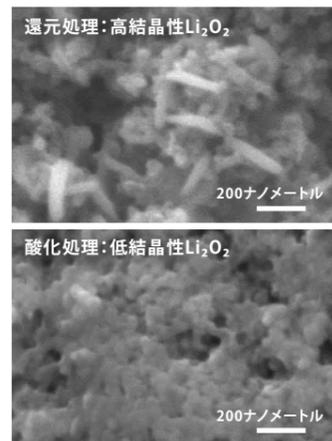


図3 放電後のカーボン正極表面の走査電子顕微鏡写真。正極を還元処理したものは過酸化リチウムの結晶性が高く、酸化処理では結晶性が低い。



# 日本最大の産学マッチングイベント オンラインで開催中、双方向の試みも

産学連携マッチングイベントで国内最大規模を誇る「イノベーション・ジャパン」。今年は新型コロナウイルス感染症の拡大状況を考慮し、初めてオンライン開催しています。会期も従来の2日間から2カ月間に延長したので、職場や自宅から手軽に、じっくり参加できます。

好評公開中の公式サイトでは、全国の大学などから集まった405件を超える技術シーズと、JST事業による注目の研究成果を、画像や1分間動画などで閲覧でき、興味を持ったらすぐ問い合わせフォームを利用できます。特集「Withコロナ～科学技術で挑む」では、

ウィズコロナ時代に役立つと期待される技術シーズをピックアップし、開発者のコメント付きで掲載している他、コロナ禍に挑むJSTの活動や成果を紹介しています。

公式サイトで参加登録すると、効率的にシーズを探索したり、全出展大学に向けて課題を投げかけたりと、ニーズとシーズの出会いを支援する「産学オンライン双方向マッチングシステム」が利用できます。さらにJST研究開発戦略センターによる「DX(デジタルトランスフォーメーション)が変える・DXで変わる研究開発の姿」他、全12本のストーリーミングセミナーも視聴できます。



イノベーション・ジャパン2020～大学見本市Online

公開期間:9月28日(月)～11月30日(月)  
閲覧料:無料(参加登録あり)  
主催:JST  
共催:文部科学省

<https://ij2020online.jst.go.jp>

話題

研究成果最適展開支援プログラム 西日本豪雨復興支援(A-STEP機能検証フェーズタイプ) 課題「人手による復興作業の負担軽減に資する作業用具の提案」

# 雪国生まれのシャベル、豪雨被災地をすくえ

柄がZ型に屈曲したシャベル。ゆがんでしまったわけではありません。これは室蘭工業大学地方創生研究開発センター長の吉成哲教授が機械工学、人間工学に基づいて開発した、腰回りの負担が小さいシャベルなのです。

雪かき作業では、前屈姿勢のため上半身の体重が腰に負担をかける上、持ち上げる時さらに力がかかります。吉成教授は屈曲柄を採用して前傾角度を減らし腰への力学的な負担を低下させた、ユニバーサルデザインの雪シャベルを企業や道立の工業試験場と共同で開発し、2008年度グッドデザイン賞を受賞しました。

その10年後に発生したのが西日本豪雨です。西日本を中心に、各地で河川の氾濫や洪水、土砂災害が発生しました。豪雨災害では住宅街や建物内に流れ込んだ大量の土砂や流木を手で除

去する必要があります。吉成教授はA-STEPの支援を受け、雪シャベルの知見を基に柄と頭部形状などを研究し、身体への負担を13パーセント軽減できる土砂用の「Z型復興シャベル」を開発しました(図)。

その実証に向けて、今年9月には鹿児島県薩摩川内市と室蘭工業大学、



図 Z型復興シャベルの各種試作品(左)。軽量化と強度維持を両立するデザインや素材を検討、試作品で模擬作業者の酸素摂取量と作業量を計測し、人間工学的に検証、評価した(右)。

JSTが連携協定を結びました。今後、試作品を災害復興や土木作業に使い、使用感などのアンケートを実施します。製品化すれば、災害時のみならず土木、農業への展開も期待されます。



「イノベーション・ジャパン2019」で成果を紹介するJSTの伊藤公裕マッチングプランナー

Z型復興シャベルは「イノベーション・ジャパン2020～大学見本市Online」にも出展しています。

<https://ij2020online.jst.go.jp/exhibitor/or2020485.html>

vol.97



Kazuma Emiko  
数間 恵弥子

理化学研究所  
開拓研究本部 研究員



Profile

千葉県出身。2012年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(理学)。東京大学生産技術研究所特任研究員、日本学術振興会特別研究員、理化学研究所基礎科学特別研究員を経て、18年より現職。同年よりさきがけ研究者。

Q1. 研究テーマと、選んだきっかけは?  
A1. 光への関心からプラズモンの研究へ

子供の頃から絵を描くのが好きで、色彩を生み出す光に関心がありました。大学時代に光を使った化学反応に興味を持ち、東京大学大学院に進んで、立間徹教授の下でプラズモンの研究を始めました。これがとても面白く、研究者の道を選ぶきっかけになりました。

プラズモンとは、大きさが100ナノメートル以下の金属粒子が強い光吸収によって鮮やかに発色する現象です。光エネルギーを効率良く変換できるため、太陽光発電や触媒反応などさまざまな応用の可能性があります。私はプラズモンによって起こる化学反応を走査型トンネル顕微鏡 (STM) で詳しく観察して、その仕組みを明らかにしようとしています。

2018年にはプラズモンによる単一分子の反応を世界で初めて観測する



ことに成功しました。今取り組んでいるのは単一分子のプラズモンと金属基板との間に薄膜を挟んで反応を制御し、触媒の設計指針を得ようという研究です。さきがけの支援で専用のSTMを導入できたので、これを最大限に使っていきます。

Q2. 研究者を目指す人へのメッセージ  
A2. 不透明な時代こそ、決めたことを全力で頑張る

科学は人類の財産であり、未来への希望です。それに関わっていける研究者は幸せだと思います。先行きが不透明な時代だからこそ、安定志向は通用しません。私の母も研究者で、大学院生の頃「やると決めたなら10年はしっかりやりなさい」と励まされました。自分自身で何をすべきかしっかり考え抜いて、決めたら全力で頑張っていくことが大切です。

理化学研究所は、コロナ禍で4月から2カ月半の間閉鎖され、全く実験ができませんでした。そこで、若手を中心にオンラインで勉強会をしたり、論文の執筆を進めたりと、有意義に過ごせるよう工夫しました。貴重な考察の期間だったと思います。5月にはさきがけの2つの研究領域合同によるオンライン公開シンポジウムで発表する

機会がありました。こうした発信を通じて、研究が進められずにもどかしい思いをしている仲間を元気付けられたらうれしいです。

6月中旬からようやく実験を再開できました。今まで以上にしっかり計画を立てて、研究や学生の指導に取り組んでいきます。

Q3. 休日の過ごし方は?  
A3. 色彩を求めて旅行

旅行とおいしい物が好きです。学生時代には油絵も描いていたので、海外の美術館をよく訪れました。オランダではフェルメールの名画「真珠の耳飾りの少女」を、誰もいない部屋でゆったりと鑑賞できました。青いターバンの色彩が印象的でした。日本にはない海の青を見たくてバハマやニューカレドニアへ行ったこともあります。色の世界が好きだということをあらためて実感します。

遠出ができない今は、新しく買った調理家電を最大限に活用しておいしく調理しようと、実験みたいに日々試行錯誤しています。



リサイクル適性 (A)  
この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。

R70  
古紙/再生紙配合率70%再生紙を使用

JST news

November 2020

発行日/令和2年11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