



国立研究開発法人
農業・食品産業技術総合研究機構

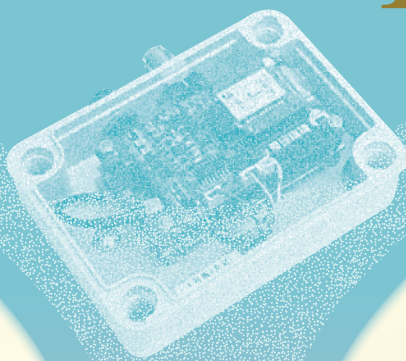
NARO

NARO

農研機構技報

Technical Report

No. 8
/ Mar. / 2021



アイデアを

かたちに



Topics

- ▶ SATテクノロジー・ショーケース2021
- ▶ 種子の寿命はどのくらい？



Society 5.0 農業・食品版の実現とSDGs④

生物多様性、森林、海洋などの環境の保全

陸域生態系の保護、回復、持続可能な利用の促進、砂漠化への対処、
土地の劣化の阻止・回復および生物多様性の損失を阻止

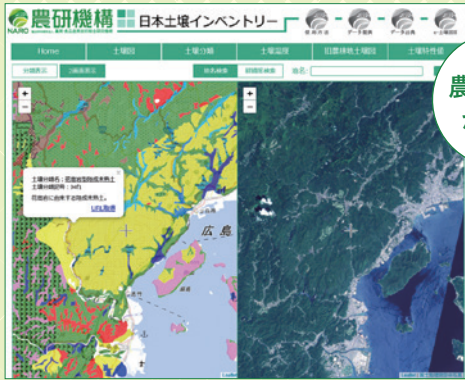


土壌の種類、分布、特性などの情報

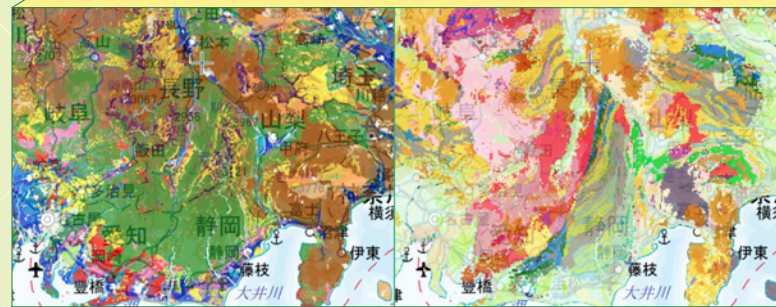
日本土壌インベントリー

インベントリー (inventory) とは財産目録という意味で、
農業生産の基盤である土壌は
かけがえのない財産であることから、名付けられました。

農研機構
が開発



<https://soil-inventory.dc.affrc.go.jp/>
(2017年4月公開)



WAGRI

民間・ICTベンダー

農業生産者



土壌の種類に適合した肥料の種類や量、
借上げ候補農地の土壌特性の確認

都道府県・
農業普及所・
農協の担当者



施肥基準などとの連携、土づくりの技術指導、
新人研修などの技術研修

行政担当者

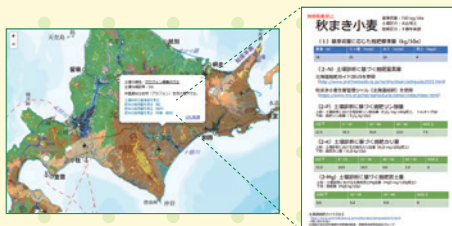


農林水産省、環境省、厚生
労働省の技術書やガイドライン

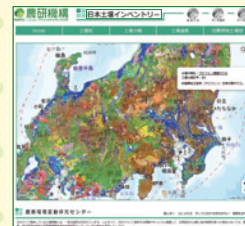
全国デジタル土壌図

技術の導入先

活用例



デジタル土壌図と
作物栽培指針などの
連携事例



土壌図閲覧ページ

縮尺20万分の1相当の全国土壌図。
拡大していくと、縮尺5万分の1
相当の農耕地土壌図へと
段階的に切り替わる。

15

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS


持続的な営農・食料生産の基礎となる
土壌データを提供する。

- 04 アイデア、技術を使える形に
山本 俊哉
- 06 増粘剤やグルテンを含まず
基本原料だけでつくる米粉パンの開発
矢野 裕之
- 10 発電細菌を利用した革新的な
バイオ電池およびバイオセンサー
横山 浩
- 14 抗体活性を持つ新しいシルク素材
「アフィニティーシルク」の開発
佐藤 充
- 18 自動運転田植機の開発
山田 祐一
- 22 農業用水路から流水熱を取り出す！
三木 昂史 後藤 真宏
- 26 超音波を利用した新たな物理的防除技術
中野 亮
- 30 判断の根拠を可視化できるAIを開発
－生産者も納得の病虫害診断に活用－
ハバラガムワ ハルシャナ 大石 優
- <トピックス>
- 34 ▶SATテクノロジー・ショーケース2021
- 36 ▶種子の寿命はどのくらい？
山崎 福容
- 38 再思三省

市民・学生



基礎知識、学習、研究

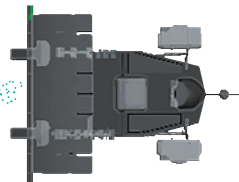


LEAD

アイデアを かたちに

数千の特許、数百の品種（育成者権）、
百を超えるプログラム・ソフトウェアを始めとする多くの知的財産は、
得られた研究開発成果を社会実装につなげるための橋渡しとなります。

アイデア、技術を使える形に



知的財産部長 山本 俊哉

YAMAMOTO Toshiya

農研機構は、公的試験研究機関として持てる力を最大限に発揮し、グローバルな視野の下に、その目的である農業・食料・環境に係る課題について、優れた研究成果を生み出し、それを速やかに社会還元することが求められています。そして、安全な食料の安定供給と自給率向上への貢献、農業・食品産業のグローバル産業競争力の強化、環境保全および新たな産業創出を通じて、農業・食品分野で科学技術イノベーションを創出して社会の持続的発展に貢献することを目指しています。

得られた研究開発成果の実用化を促進するために、2018年10月に知的財産部署を強化して、知的財産マネジメントを戦略的に推進しています。そして、戦略的な知的財産マネジメントにより知的財産権を拡大し研究成果の社会実装を促進すること、強い品種育成者権の確保により輸出促進を支援して農産物のグローバル競争力を強化すること、国際標準化活動の推進によりグローバル競争力を強化すること、に取り組んでいます。

本技報では、農研機構を広く知っていただくことに加え、農研機構が生み出した研究成果について、企業や生産者が技術導入により新事業の展開や生産性の向上などを検討できるよう、また研究機関が実用化研究の実施を検討できるよう、必要な情報を掲載しています。今回の技報では、すでにプレスリリースや論文で公表し、あるいは関連特許を登録済みの技術成果を選びすぐって、紹介します。

農研機構では、数千の特許、数百の品種（育成者権）、百を超えるプログラム・ソフトウェアを始めとする多くの知的財産を保有しており、ホームページを通じて公開しています (<http://www.naro.affrc.go.jp/collab/index.html>)。品種では、ホームページに、農研機構育成品種に関するお知らせ、品種のリスト、種苗入手先リスト、品種の利用方法を掲載し、特許では約700件の利用可能な特許、特許利用に関するお問い合わせ、独占許諾の申し込み手続きを、プログラムでは一覧や利用に関するお問い合わせを掲載していますので、是非ご利用ください。

農研機構の産学連携・品種・特許

詳細はこちらから ▶



増粘剤やグルテンを含まず 基本原料だけでつくる米粉パンの開発

矢野 裕之

YANO Hiroyuki

はじめに

小麦粉でつくるパンは、欧米をはじめ様々な国で主食として消費されています。日本でも朝食にパンを食べる機会が多くなり、一般家庭の家計に占める消費額でパンが炊飯用米を上回ったことが総務省による2011年の家計調査で報告されました。わが国の米の1人当たりの年間消費量は1962年度をピークに一貫して減少傾向にあります。1962年度に118kgの米が消費されていましたが、2018年度にはその半分以下の53kgにまで減少しました。農林水産省では、国産米の需要を拡大するために米や米粉の加工利用を促進する様々な取り組みを進めており¹⁾、日本で自給できる米粉を主原料にパンをつくることができれば、食料自給率の向上に貢献できると期待されています。

通常、パンは小麦粉を主原料につくられます。小麦粉に水とイースト、砂糖、食塩、油脂などを加えて練ると粘り気の強い生地ができます。これは小麦に含まれる蛋白質のネットワークである「グルテン」が生成されたからです。生地を30～35℃程度で保温するとイーストが発酵し、炭酸ガスとアルコールが発生します。グルテンはその粘性で発酵ガスを閉じ込めるため、風船のように生地が膨らみます。これを焼くとパンになります。焼きたてのパンは、食欲をそそられる香りが生成され、パンの美味しさを構成する大切な要素となります。しかし、小麦アレルギーやグルテンに対して強い免疫反応を示すセリアック病患者の方は、小麦粉を原料にしたパンを食べることができません。その対応として小麦粉ではなく米粉を主原料にしたパンが開発されていますが、米粉生地は発酵ガスを閉じ込めるグルテンがないため、ほとんど

のものでグルテンの代わりになる増粘剤(高分子ネットワークをもつ増粘多糖類^{※1})が添加されています。本稿では、農研機構で開発され、2019年に特許登録された増粘剤やグルテンを含まず基本原料だけでつくる米粉パンの製造法と、このパンが膨らむメカニズムについて紹介します。

増粘剤・グルテンなしでパンをつくる

パンをつくるために使用する原料は米粉、水、ドライイースト、砂糖、食塩と菜種油だけです。これらを混合し、攪拌した生地は小麦粉パンの生地のように粘性のあるものではなく、てんぷら粉を水で溶いたような、さらっとした生地になります(図1A)。また、発酵中の生地は泡立ってメレンゲのように柔らかく、粘性が高くまとまりやすい小麦粉パンの発酵生地とは物性が明らかに異なっていました(図1B)²⁾。これをオーブンで180～200℃、20～30分ほど焼成すると小麦粉パンと同じような気泡構造をもつパンになりました(図1C)³⁾。

このパンをつくるためにいくつかのコツがあります。まず、使用する米粉は澱粉の損傷度が低いものが適していました(図2)。製粉する前の米粒(白米)は主に多面体構造の澱粉粒が集まってできています(図2A)。製粉する際には米粒同士をジェット気流中で強くぶつけあたりして粉碎します。このとき、澱粉粒が粉碎の際の衝撃や摩擦熱などで損傷を受けることがあります(図2B)。製粉方法や条件によって澱粉が損傷する度合い(損傷度)は異なります。図2C、Dは損傷度の異なる米粉を原料にパンを作製し、それぞれ発酵・焼成時の様子を比較したものです。損傷度の低い米粉で作製した場合、発



酵生地はパンケース上部まで十分膨らみ、その後焼成しても生地が膨らみが維持され、ふっくらしたパンになります(左)。一方、損傷度の高い米粉で作製した場合(右)には、発酵時に生地が膨らみが悪く、焼成しても硬いパンになります。

米粉の損傷の度合いは原料に使用する米品種や製粉法によって異なります。例えば、農研機構で開発した「ミズホチカラ」は製粉する際に砕けやすいため、粉碎

のために強い衝撃を長時間与える必要がなく、澱粉の損傷度が低い米粉を製造できます⁴⁾。また、米粒を湿らせて、吸水させてから粉碎すると米粒が砕けやすく、その上、摩擦熱による温度上昇が気化熱により抑制されるため、澱粉の損傷度を低減することができます。この製粉法は湿式粉碎法と呼ばれています。

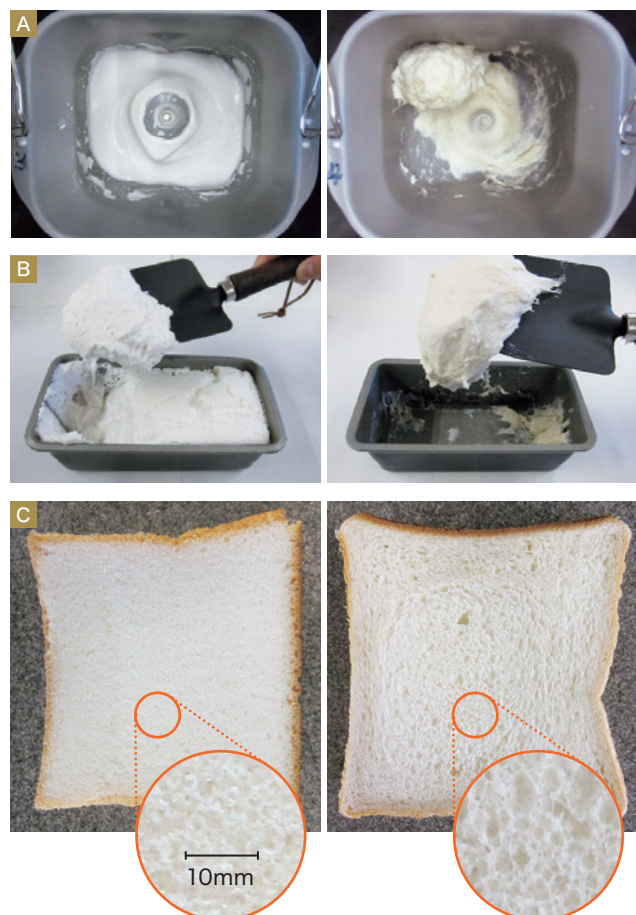


図1 グルテン・増粘剤不使用パン(左)と通常的小麦粉パン(右)混合(A)・発酵(B)中の生地およびパン断面(C)を比較しました。



図2 米粉の澱粉損傷とパン

Aは気流粉碎で米粒から米粉を製粉するイメージ図。低・高損傷度の米粉(B)を用いて作製したパンの発酵(C)・焼成(D)の様子を比較しました。

パンが膨らむメカニズム

では、グルテンや増粘剤を原料に含まないパンがどうして膨らむのでしょうか？ その理由は、広島大学・ヴィレヌーヴ真澄美教授との共同研究で明らかになりました⁵⁾。鍵は「シャボン玉」です。

水と油は混ざりませんか？ でも、界面活性剤を加えて攪拌すると小さな油の粒の周りを界面活性剤の分子が取り囲んで水に浮かびます(図3)。これは乳液などみられるエマルションです。同じように水と空気も混じらないですが、水に洗剤を入れてかき混ぜると泡(フォーム)がしばらく消えずに残ります。20世紀前半に、微粒子が界面活性剤と同じように働き、エマルションやフォームを安定化させることが発見されました⁶⁾。前者は微粒子型エマルション、後者は微粒子型フォームと呼ばれます。添加物やグルテンを使用しない米粉パンでは、損傷度の低い微細な米澱粉粒が生地の発酵ガスを包み込んでシャボン玉のように泡(フォーム)を形成し、膨らみを

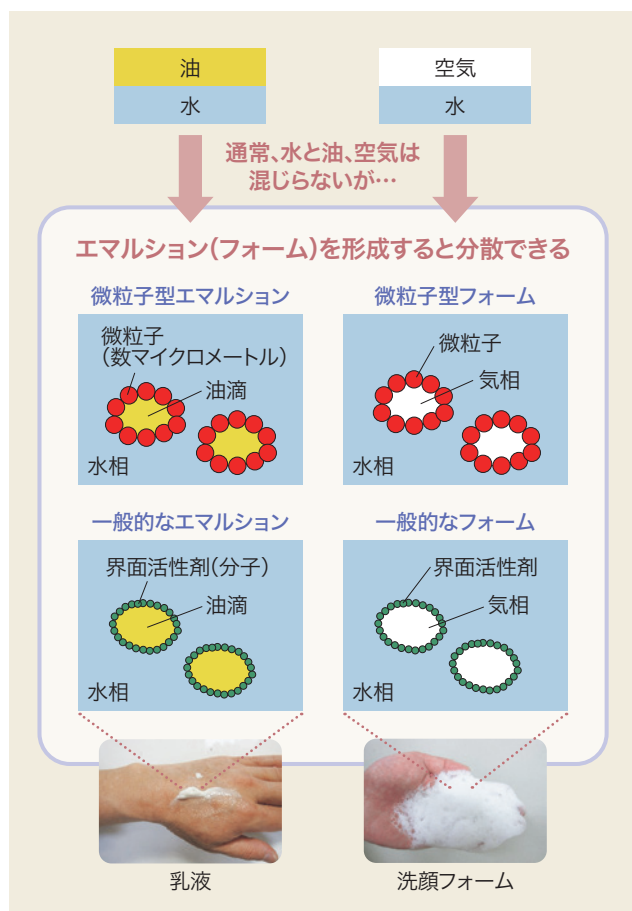


図3 微粒子型フォームについて

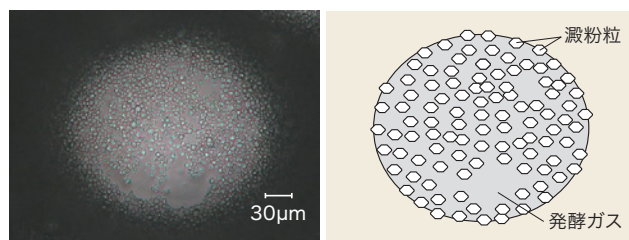


図4 発酵中の米粉生地の光学顕微鏡観察(左:写真、右:説明図) 澱粉粒が発酵ガスを取り囲んで微粒子型フォームを形成する様子が観察されています。

Reprinted from LWT Food Sci. Technol., Vol.79, Yano, H. et al, Development of gluten-free rice bread: Pickering stabilization as a possible batter-swelling mechanism. Page 634. Copyright (2017), with permission from Elsevier.

維持することにより、発酵過程で生地が潰れることなく、膨らむことが顕微鏡観察で確認されました(図4)。

図5は、小麦粉パン(A)と本研究成果のパン(B)について製造工程を比較したものです²⁾³⁾。小麦粉、水、イースト、砂糖、食塩、油脂などの生地を混合してこねると、グルテンが生成され生地の粘性が高くなります。一方、グルテンを含まない米粉生地では澱粉粒が水の中で攪拌され、粘性は低いままです。イーストが発酵ガスを生成し始める発酵初期には生地のあちこちで微小な気体が発生します。小麦粉生地では粘性の高いグルテンのネットワークがこれを閉じ込めるため、生地は「風船」の集合体になり、粘り気の強い生地ができます。パンをつくる際、グルテンを強化するために発酵中の生地をテーブルにたたきつけることがあります。グルテンの編目状の生地は衝撃に強いいため、すぐにまた膨らみます。一方、米粉生地では、澱粉粒が気体を柔らかく取り囲み、「シャボン玉」のような泡(フォーム)の集合体であるメレンゲに似た壊れやすい生地ができます。発酵中のパンケーキを「トン」と静かに落とすだけで瞬時に生地はしぼんでしまい、再度膨らむことはありません。また、米粉生地では発酵の際に温度のぶれがなく一定であることが重要です。温度が高くなったり低くなったりすると、「シャボン玉」のような泡(フォーム)が膨らんだり縮んだりして壊れやすいためです。発酵が進むと、小麦粉パンでは気泡の大きさは必ずしも均一ではなく、大小不ぞろいになっています。一方、米粉パンでは泡(フォーム)の大きさがそろっています。これは安定した発酵温度の下、一定の速度で気泡が生長した場合だけ、パンを

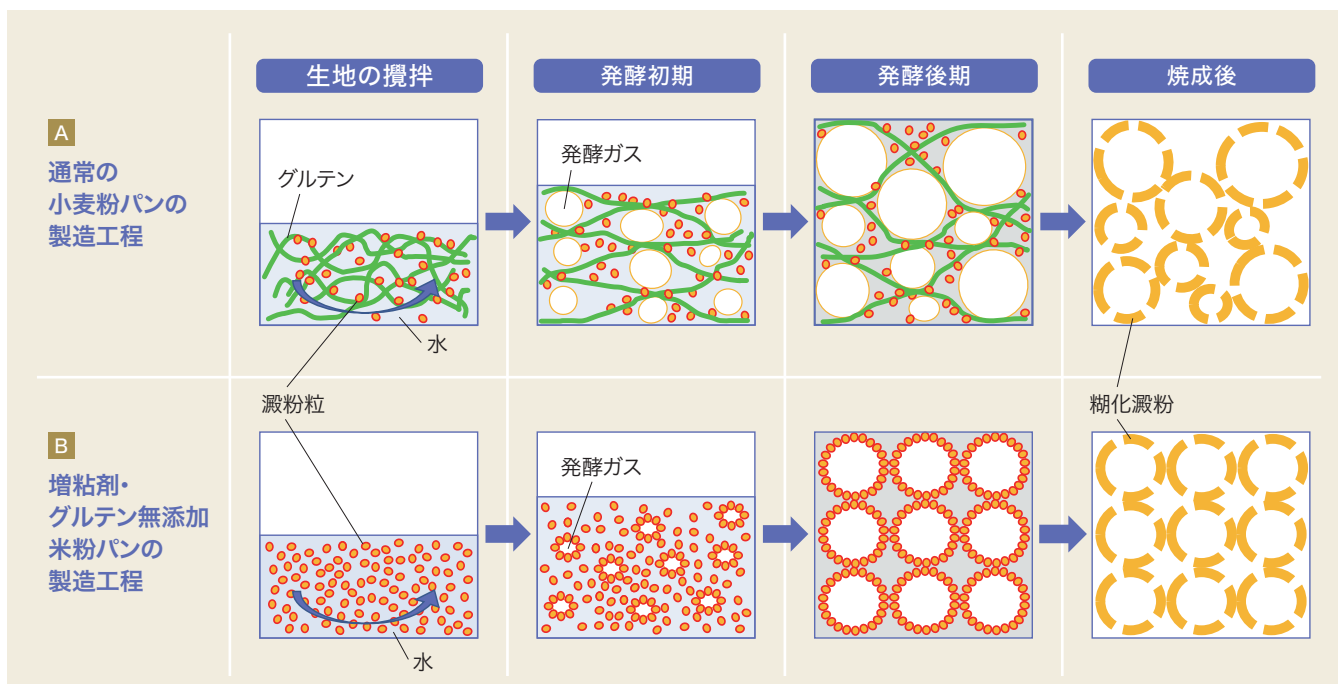


図5 小麦粉パン(A)と米粉パン(B)の製造工程の比較

うまくつくることができるからです。

澱粉の損傷度と澱粉粒の吸水性には正の相関があることが知られています⁷⁾。生地（生地）の発酵の際、澱粉の損傷度が高いと気泡膜を形成する澱粉粒が水を吸水し重くなります。また、微粒子型フォームでは、気泡膜を形成する粒子の親水／疎水性バランスが重要であることが報告されています⁸⁾。このため、澱粉粒が発酵途中で吸水すると多面体構造が崩れるとともに親水／疎水性バランスが変化し、フォームの維持ができなくなると考えられます。できあがったパンの気泡構造を比べてみましょう。小麦粉パンの気泡は大小様々であるのに対し、増粘剤やグルテンを含まない米粉パンでは気泡が小さくそろっていることがわかります（図1C）。

おわりに

開発した製パン技術については2015年7月に特許出願し、2019年9月に登録されました⁹⁾。今後は、パン製造者をはじめ様々な企業に技術提供し、食味、品質、価格の面で消費者に満足いただけるパンの実用化を目指します。また、小麦粉製品を摂取できない小麦アレルギー患者やセリアック病の方が国内外におられます。こ

のパンや米粉を国内のみならず、海外展開するための準備も進めています。

（食品研究部門 食品加工流通研究領域）

用語解説

※1 増粘多糖類 HPMC(ヒドロキシプロピルメチルセルロース)やキサンタンガム、グアーガムなど、水に分散した際に粘性を示す多糖類の総称。様々な食品で粘りやとろみを付与するために利用されている。

参考文献

- 1) 農林水産省(2021) 米粉をめぐる状況について。
<http://www.maff.go.jp/j/seisan/keikaku/komeko/attach/pdf/index-194.pdf> (参照 2021-1-20)
- 2) Yano, H. (2019) Recent practical researches in the development of gluten-free breads. npj Science of Food, 3, Article No.7.
- 3) Fu, W. and Yano, H. (2020) Development of "new" bread and cheese. Processes, 8(12), Article No.1541.
- 4) 佐藤宏之ら(2017) 米粉パン、飼料用米及び焼酎原料等、多用途利用される暖地向き多収米新品種「ミズホチカラ」の育成。九州沖縄農業研究センター報告, vol.66, 47-63.
- 5) Yano, H. et al. (2017) Development of gluten-free rice bread: Pickering stabilization as a possible batter-swelling mechanism. LWT - Food Science and Technology, vol.79, 632-639.
- 6) Pickering, S. U. (1907) Emulsions. Journal of the Chemical Society, vol.91, 2001-2021.
- 7) Hasjim, J. et al. (2012) Milling of rice grains: The roles of starch structures in the solubility and swelling properties of rice flour. Starch/Stärke, vol.64, 631-645.
- 8) Du, Z. et al. (2003) Outstanding stability of particle-stabilized bubbles. Langmuir, vol.19, 3106-3108.
- 9) 矢野裕之(2019) グルテン及び増粘剤を含まない米粉パンの製造方法。特許第6584185号。

発電細菌を利用した革新的な バイオ電池およびバイオセンサー

横山 浩

YOKOYAMA Hiroshi

はじめに

発電細菌とは、有機物を分解する際に発電する性能をもつ細菌グループの総称です。自然界の土壌や池、海底、動物の消化管など様々な嫌気性^{*1}環境に幅広く生育しており、多くの細菌種が知られています。発電の原料として都市下水や畜産排水、池の泥に含まれているセルロースなどの糖類、有機酸、アルコール、タンパク質、アミノ酸など様々な有機物を利用でき、発電の際、燃料となる排水の滅菌や発電細菌の純粋培養の必要がありません。

「電気を作る」という興味深い特徴から発電細菌は世界中で注目され、活発な研究開発が行われています。この細胞外の固体状導電性物質に電子を伝達する発電細菌（コラム参照）の特徴を上手に利用すれば、発電細菌を利用したイノベーションにつながると期待されます。

・ コラム ・

電気を作るとは「電流を生み出す」ことであり、それは細胞の内にある電子を細胞外にある固体の導電性物質（＝電極）に渡す現象です。その電子は有機物の酸化的分解で生じます。人間を始めとした好気性の生物は、有機物の分解で生じる電子を酸素に渡してエネルギーを獲得しています（酸素呼吸）。一方、地球は鉄の惑星と言われており、土壌には酸化鉄が豊富に含まれています。**Geobacter**属細菌などの酸化鉄還元細菌は発電力の高い発電細菌として知られていますが、自然界では細胞外にある固体の酸化鉄を電子受容体として利用します（鉄呼吸）。発電細菌は酸素の代わりに電極を電子受容体として利用して、生存や増殖に必要なエネルギーを獲得しているのです。太古の地球には大気中に酸素が含まれていなかったと考えられています。嫌気性の細菌が酸素以外の電子受容体を利用できることは至極当然です。

しかし、装置の作製コストが高く、さらに発電出力や安定性も低いことから、発電細菌を利用した装置は未だに実用化していませんでした。本稿では開発した発電細菌によるバイオ電池およびBODバイオセンサーについて紹介します。

バイオ電池

発電細菌で得られる電力は他の発電法と比較して低いので、バイオ電池^{*2}は大規模な発電には適していません。一方、従来技術では利用できなかった排水や土壌に含まれている有機物から直接発電できる特徴があります。池には落ち葉や虫の死骸など様々な有機物が年間を通して供給されるので、バイオ電池として池に設置すれば半永久的な発電が可能です。近年、気候変動に対する懸念から、地球規模での環境モニタリングの重要性が高まっています。バイオ電池で温度センサーやCO₂センサーなどを駆動できれば、経時的な環境モニタリングに役立つと期待されます。太陽光と風力も電源として利用できますが、これらの電源は夜間や無風では発電できません。バイオ電池は天候に依存せずに24時間発電できます。

開発したバイオ電池は、正極を水面に浮かべて負極を池底に挿入した構造です（図1）。このバイオ電池は白金触媒や水素イオン交換膜など高価で劣化し易い部材を一切使用していないので、長期運転に耐える実用的な構造です。負極を泥の中に挿入すると周囲に存在している発電細菌が自発的に負電極に付着して、有機物を分解する際に発生する電子を負極に渡すことで発電が始まります。バイオ電池の分野では負極の素材としてカーボン系が常識とされており、金属系素材は使用されません。

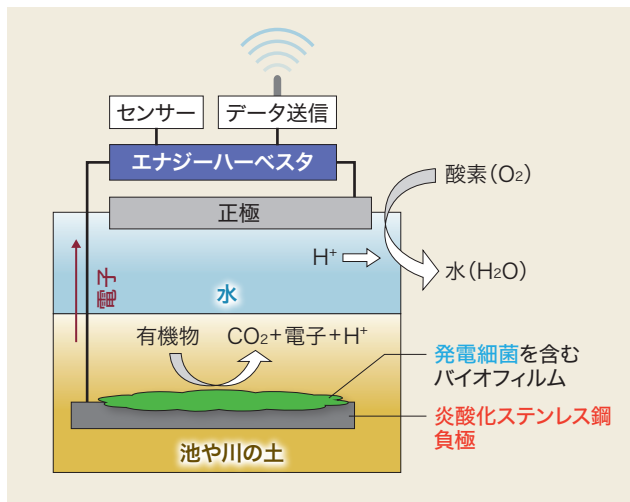


図1 バイオ電池にセンサーを駆動させるためのエネルギーハーベスタを組み合わせたバイオ電池システムの概要図

しかし、電極グレードのカーボン素材は高価で、抵抗が大きいので大型化できないという短所があります。一方、多くの発電細菌は酸化金属を還元する活性を持つことが知られていました。そこで我々は、金属系素材はバイオ発電を促進する可能性があるかと予想しました。50種類以上の金属および酸化金属を網羅的に探索した結果、ステンレス鋼の表面を炭酸化させた炭酸化ステンレス鋼電極がバイオ発電を促進することを発見しました¹⁾⁻⁴⁾。炭酸化処理により電極の表面には多数の隆起物が形成されてい

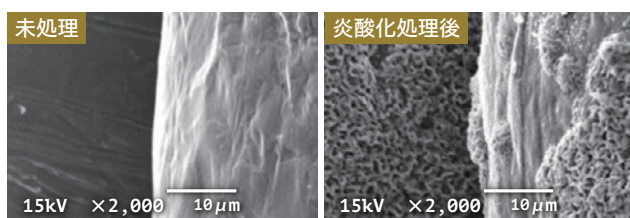


図2 電極に使用するステンレス鋼の電子顕微鏡(SEM)画像 未処理(左)および炭酸化処理後(右)

起物は主としてヘマトイトと呼ばれる発電細菌が好む酸化鉄 (Fe_2O_3) から構成されていました。このため、炭酸化ステンレス鋼電極の表面に形成される生物膜(バイオフィーム)にはカーボクロス電極よりも高密度で発電細菌が含まれていました。その結果、炭酸化ステンレス鋼電極はカーボクロス電極よりも発電電力が高く(図3)さらに安価(1/10~1/100)です。導電性および物理的な強度が高いので大型化も容易です。小型の水槽(15L)を利用してバイオ電池を作製したところ、最大で $86\mu W$ の電力が得られました。このバイオ電池に出力電圧を上げる超低消費電力のエネルギーハーベスタ(AP4470、旭化成エレクトロニクス)を組み合わせたバイオ電池システムは CO_2 センサーの駆動に初めて成功しました^{5) 6)}。 CO_2 センサーの駆動には多くの電力が必要なため、これまで発電細菌を使って駆動した事例は報告されていませんでした。本システムは、10km以上離れた所に測定データを無線送信するモジュールや位置情報を送信するビーコンモジュール、温度湿度センサーなど様々なアプリケーションモジュールも駆動できまし

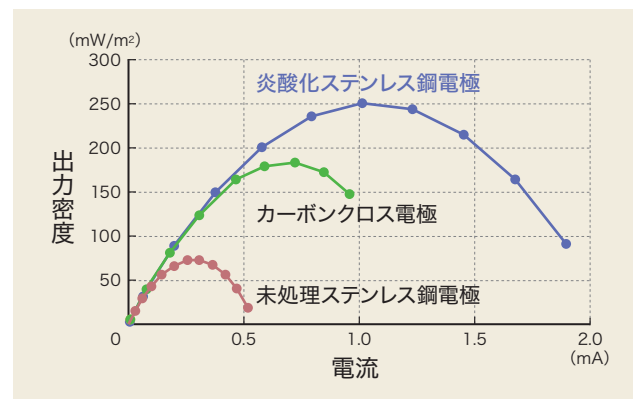


図3 炭酸化ステンレス鋼負極とカーボクロス負極によるバイオ電池の出力比較(正極の表面積当たり)

た。現在、野外の池でセンサーを駆動させる実験を行っています(図4)。これまでのところ、年間を通して安定した発電とセンサー

の駆動が確認されています。本システムは、外部電源が不要な自立駆動型の環境モニタリング装置の電源として利用を検討しています。炎酸化ステンレス鋼電極を装備したバイオ電池(センサーを含まず)は、研究開発や環境教育用として2020年より市販化されています(図5)。

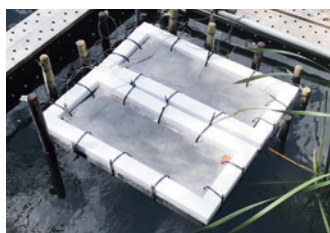
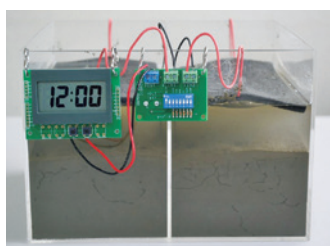


図4 畜産研究部門つくばの池に設置したバイオ電池の写真



微生物燃料電池「マイクロパワー」

図5 炎酸化ステンレス鋼負極を利用して開発された商品

BODバイオセンサー

発電細菌は水に含まれている有機物を分解して発電しますが、その際生み出される電流は有機物の濃度に比例します。一方、水中の有機物の濃度は水質の指標であるBOD^{*3}(生物化学的酸素要求量)とも相関します。つまり、発電細菌が作る電流の値からBODを推定することが可能であり、BODバイオセンサーとして利用できるのではないかと考えました。そこで我々はBODセンシングに最適な電極電位、低コストで高性能な電極素材、リアクター形状、測定条件などを解明し、初めて実用的なBODバイオセンサーを開発しました⁷⁾⁻⁹⁾。開発したBODバイオセンサーは、3本の電極(炎酸化ステンレス鋼製の作用電極、対極、Ag/AgCl参照電極)を電位制御装置(ポテンシostat)に接続した構造です(図6)。装置に排水を投入すると、排水に含まれている発電細菌が作用電極に付着してバイオフィルムを形成します。発電細菌が生み出す電流はBOD濃度に比例しており、高い精度でBODを測定できます(決定係数 $R^2 > 0.8$) (図7)。BODの測定範囲は約40~250mg/Lで、測定時間は僅か6時間です。さらにBODバイオセンサーにサンプリングから測定、データ送信、外部出力までを全自動で行う

「BOD監視システム」を開発しました(図8)。データはBOD監視システムのIoT機能によりウェブサーバーに格納され、スマートフォンやPCで排水処理施設の水質を簡単に把握でき、運転管理の省力化に有用です(図9)。

BODは水質の重要な指標であり、下水処理場などの排水処理施設において必須の測定項目です。従来法でBODを測定すると、5日間もの長い測定時間が必要でした。このため、活性汚泥法による排水処理施設の運転をBODの値に応じて制御することが困難でした。

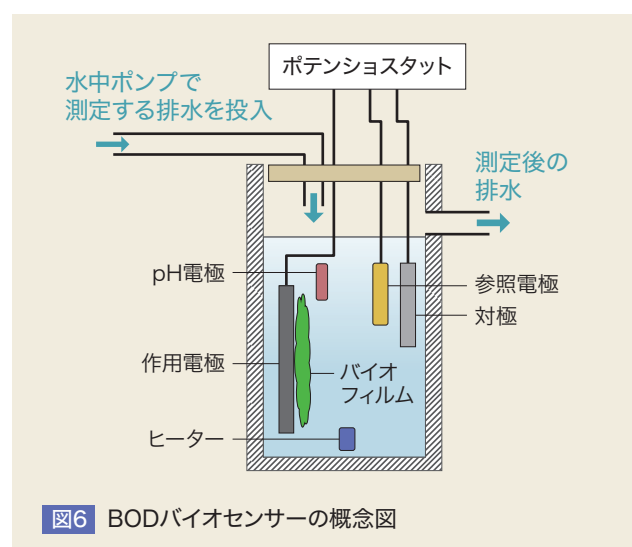


図6 BODバイオセンサーの概念図

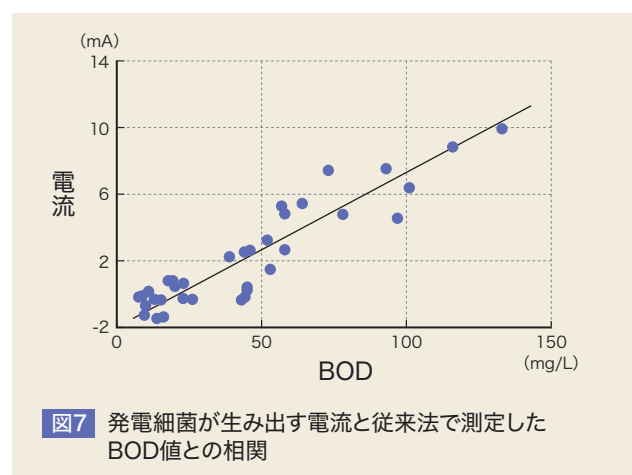


図7 発電細菌が生み出す電流と従来法で測定したBOD値との相関

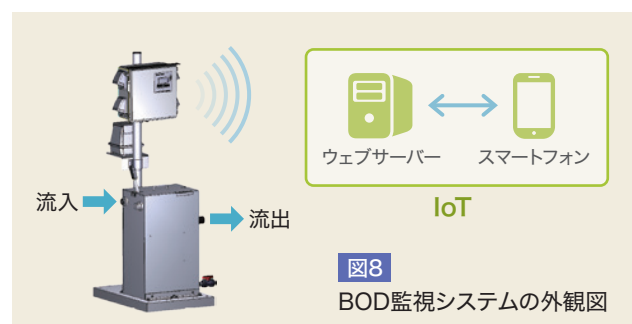


図8 BOD監視システムの外観図



図9 スマートフォンで排水処理施設の水質を遠隔監視

BOD監視システムにより排水処理施設の曝気^{※4}時間をBODの値に応じて制御して、浄化性能の向上と省エネを同時に達成する新しい排水処理法を実現できます。近年、畜産業から発生する排水中の窒素（硝酸性窒素など）に対する暫定排水基準^{※5}が厳しくなる傾向にあります。本技術は排水処理での曝気制御により排水から窒素を取り除く反応を促進することが可能で、放流基準を定めた法令対応にも役立つと期待されます。BOD監視システムは2021年の前半に市販化の予定です。

本装置によるBODの測定は公定法に代わるものではありません。水質汚濁防止法に定められている年1回以上の測定義務では公定法による測定が必要になりますが、BOD監視システムの導入には、排水処理施設が適正に設計・運転管理されている必要があります。

おわりに

発電細菌を活用したバイオデバイスの開発が本格的に始まったのは2010年代からです。歴史は浅く、発電細菌には大きな可能性が残されています。これまでの研究開発では、大規模な発電を行うことに重点が置かれてきました。発電細菌には、発電力は低い但有機物が供給されれば、ほぼメンテナンスフリーで半永久的に電流を生み出すという特性があります。今後はその性質を巧みに利用して、新たな用途での活用がより重要になると考えられます。発電細菌の利用では「低コスト」であることが特に重要であり、斬新かつ実践的なアイデアが必要です。

(畜産研究部門 畜産環境研究領域)

付記：BOD監視システムは、農研機構生研支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業（うち経営体強化プロジェクト）」の支援を受けて開発されました。

用語解説

- ※1 **嫌気性(けんきせい)** 酸素(空気)が存在しない環境を嫌気と言います。嫌気環境を好み酸素があると増殖できない細菌グループは、嫌気性細菌と呼ばれます。
- ※2 **バイオ電池** 生物の一部または個体を利用して電気を生み出す装置です。タンパク質(酵素)を利用したものや細菌そのものを利用したものなど、様々なバイオ電池が研究されています。本稿のバイオ電池は様々な種類の発電細菌群から構成されるバイオフィームを利用したもので、微生物燃料電池(Microbial Fuel Cell; MFC)とも呼ばれます。
- ※3 **BOD** 生物化学的酸素要求量(Biochemical oxygen demand)のことで、微生物が分解できる有機物の量を反映しています。一般的には水の汚れを示す指標として用いられ、排水浄化処理や河川の水質管理において重要な測定項目です。BODの値が高い程、水は汚れていて、BODの値が低い程、水はきれいであると判断されます。
- ※4 **曝気(ばつき)** 浄化槽に大量の空気を注入する操作です。微生物が排水中の有機物を分解してBODを減少させるためには、曝気が必要です。曝気には大量の電力が消費されており、排水処理施設のランニングコストの多くを占めています。本システムはBODが基準値以下まで低下した時、曝気を停止させて消費電力を削減して省エネにする制御が可能です。
- ※5 **窒素(硝酸性窒素など)の暫定排水基準** 排水中に含まれている窒素は湖沼の富栄養化の原因であり毒性もあることから、適正に除去した後、放流する必要があります。水質汚濁防止法では排水中の硝酸性窒素など(アンモニア、アンモニウム化合物、亜硝酸化合物および硝酸化合物)を一律排水基準である100mg/L以下に規制しています。畜産業を含む11の業種には暫定の排水基準が定められています。この暫定排水基準は3年ごとに見直しが行われます。畜産業に対しては、2019年7月から600mg/Lから500mg/Lに引き下げられました。今後、この暫定排水基準はさらに厳格化される可能性があります。畜産業を持続的に行うためには強化傾向の排水基準をクリアできる浄化施設の整備が必須です。

参考文献

- 1)横山浩ら(2020) 微生物燃料電池用電極の製造方法、特許第6429632号。
- 2)Yamashita, T. et al. (2016) Enhanced electrical power generation using flame-oxidized stainless steel anode in microbial fuel cells and the anodic community structure, *Biotechnol. Biofuels*, vol.9, 62.
- 3)Yamashita, T. and Yokoyama, H. (2018) Molybdenum anode: a novel electrode for enhanced power generation in microbial fuel cells, identified via extensive screening of metal electrodes, *Biotechnol. Biofuels*, vol.11, 39.
- 4)横山浩ら(2016) 炎酸化ステンレス鋼負極は微生物燃料電池の発電を促進させる。農研機構 研究成果情報。
http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/4th_laboratory/nilgs/2016/nilgs16_s09.html (参照 2021-2-1)
- 5)Yamashita, T. et al. (2019) Ultra-low-power energy harvester for microbial fuel cells and its application to environmental sensing and long-range wireless data transmission, *J. Pow. Sources*, vol.430, 1-11.
- 6)横山浩ら(2019) CO₂センサーを駆動できる初めての微生物燃料電池システム。農研機構 普及成果情報。
http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/4th_laboratory/nilgs/2019/19_026.html (参照 2021-2-1)
- 7)横山浩ら(2020) 微生物電解セル、特許第6327718号。
- 8)Yamashita, T. et al. (2016) A novel open-type biosensor for the in-situ monitoring of biochemical oxygen demand in an aerobic environment, *Sci. Rep.*6:38552
- 9)横山浩ら(2018) 排水処理に役立つBOD(生物化学的酸素要求量)監視システム。農研機構 普及成果情報。
http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/4th_laboratory/nilgs/2018/18_022.html (参照 2021-2-1)

抗体活性を持つ新しいシルク素材 「アフィニティーシルク」の開発

佐藤 充

SATO Mitsuru

はじめに

カイコが吐くシルク（絹）はフィブロイン^{*1}（繊維タンパク質）とそのまわりを覆うセリシン（糊状タンパク質）の2種のタンパク質で構成されています。カイコは孵化してから約3週間で体重を1万倍に増やし、およそ3gの幼虫が300～500mgのタンパク質を合成して繭^{まゆ}を作ります。カイコは優れたタンパク質生産系として注目され、2000年に農研機構（当時は、蚕糸・昆虫農業技術研究所）によりカイコの遺伝子組換え技術が確立されました¹⁾。他の生物由来の遺伝子を導入した遺伝子組換えカイコ（以下組換えカイコ）を作出することにより、医薬品・検査試薬・化粧品の原料として利用できる有用タンパク質をカイコで生産することが可能となりました。また新しい機能を持ったシルクの創出も可能となり、例えばクラゲやサング由来の蛍光タンパク質とフィブロインとの融合タンパク質を産生する組換えカイコからは蛍光を発するシルクを作出することができます（図1）。

生体内に侵入した異物（抗原）に働く抗体^{*2}は特定の種類のタンパク質などに特異的に結合する性質を持つことから、基礎研究や医療に至る幅広い分野で利用されています。抗体はこれまで、抗原となるタンパク質やペプチドをマウスやウサギなどの動物に接種し、動物の体内で作られた抗体を回収して利用してきましたが、近年の動物愛護の観点から代替方法が求められ、遺伝子工学の進歩により抗体の遺伝子を導入した培養細胞から抗体を作ることができるようになりました。しかしながら製造コストの高さが問題となっており、より低コストの抗体産生技術が求められました。

本稿では、低コストで優れたタンパク質生産系である組換えカイコを用いて、特定のタンパク質に結合する抗体特有の性質（アフィニティー）をシルクに付加した新規シルク素材「アフィニティーシルク」^{*3}についてご紹介します。

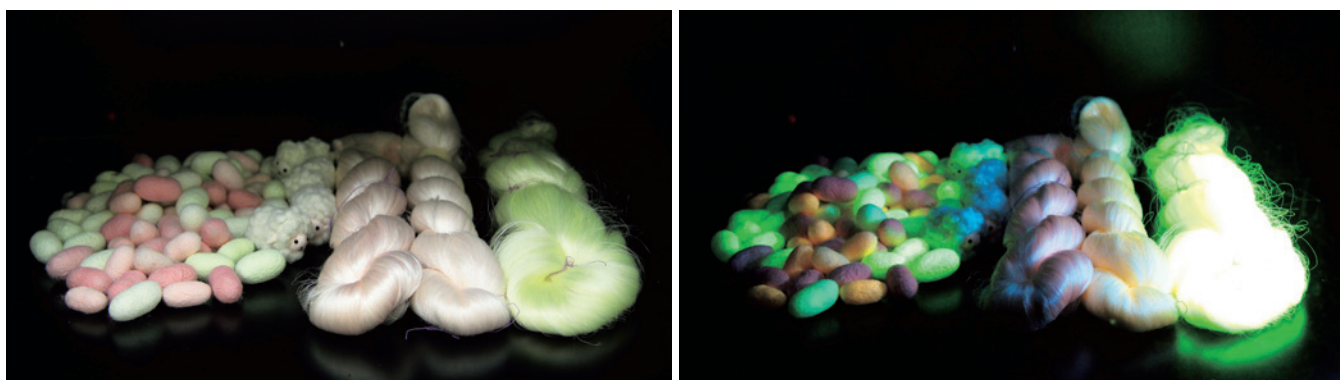


図1 蛍光を発する組換えシルク

様々な蛍光タンパク質の遺伝子を導入することにより、カラフルな蛍光シルクが作り出されます。ブラックライトを当てると蛍光物質だけが発光します(右の写真)。



アフィニティーシルクのデザイン

遺伝子組換え技術により、抗原の特異的認識に関わる抗体の重鎖および軽鎖の可変領域 (VHとVL) をつないだ一本鎖抗体 (single-chain variable fragment: scFv) がデザインされました。この一本鎖抗体は分子量が約30kDaで、完全長抗体 (約150kDa) と比べて非常にコンパクトな形状をとり (図2)、一本鎖抗体のもととなる抗体とほぼ同等の抗原認識、結合能を持つことが確かめられました²⁾。

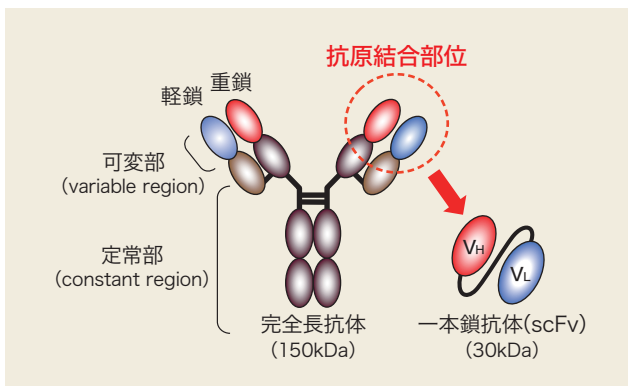


図2 一本鎖抗体のデザイン

抗体はそれぞれ相同な2本の重鎖と軽鎖が分子内結合により組み合わさり、Y字の構造をとっています。この中の重鎖と軽鎖の可変部 (VHとVL) が対となり、抗原を認識して結合します。この抗原認識に必要なVHとVLをつないで低分子化したものを一本鎖抗体 (scFv) と呼びます。

一方、前述したカイコの遺伝子組換え技術により、抗体を融合したシルクタンパク質の生産が可能となりました。ただし、完全長抗体を融合させたシルクを作製する場合の問題点として、抗体活性に必要な正しい立体構造をとることが困難であると考えられました。シルクタンパク質は高度に繊維化された構造体です。シルクタンパク質の繊維化プロセスにおいては、完全長抗体の正しい



図3 一本鎖抗体とフィブロインL鎖の融合タンパク質からなるアフィニティーシルク

アフィニティーシルクではscFvがフィブロイン繊維の内側および表面に多数存在すると考えられます。

立体構造をとるために必要な分子内結合ができないため、抗体活性をもつことができません。そこで抗体に関しては、抗体の分子内結合を必要としない一本鎖抗体を選択し、それをシルクタンパク質の中で比較的親水性が高く、他のタンパク質との融合発現実績があるフィブロインL鎖タンパク質に発現させることとしました (図3)。

これまでにカイコを利用した組換え抗体生産に関しては、組換えバキュロウイルスを用いた抗体遺伝子導入による発現や組換えカイコにより抗体をセリシン層に発現させ、回収する方法がすでに報告されていました。しかしこれらの技術は抗体をタンパク質として単独で発現させて回収することに注目した技術であり、抗体活性を付加した機能性シルクタンパク質の製造という概念とは全く異なります。

がんマーカーを検出できる アフィニティーシルクの創出

CEA (carcinoembryonic antigen: がん胎児性抗原) は胎児の消化器系細胞で発現しているタンパク質の一種ですが、がん細胞が増殖している組織からも作り出されるため、がんマーカーとして胃がん・大腸がんなどのスクリーニング検査に広く利用されています。このCEAを特異的に認識する一本鎖抗体とフィブロインL鎖との融合タンパク質を繭糸に発現する組換えカイコを作出しました。この組換えカイコが産生した繭糸を9M臭化リチウム溶液で溶解してシルク水溶液を調製し、透析や精製などの特別な処理は行わずに、シルク水溶液を直接96穴の解析用プラスチックプレートに注ぎ、4°Cで一晩コーティングしてELISA*4プレートを作成しました(図4a)。このELISAプレートを用いてCEAの定量試験を行った結果、高感度にCEAを検出することに成功しました(図4b)。

以上の結果から組換えカイコが産生した繭糸から、非常に簡便な方法で標的の抗原に特異的な結合活性をもつシルクタンパク質素材(水溶液)の製造が可能となりました。組換えカイコが産生した繭1個からELISA

プレートを20枚以上作製することができ、安価な疾病診断キットの提供が可能です³⁾。

今後の展望

がんなどの疾病マーカー以外にも、ウイルスや細菌などの病原体に特異的なアフィニティーシルクの開発を行い、それらの病原体の感染有無を迅速に判断できる診断キットの材料としての利用も期待されています。他にもアフィニティーシルクの特異的な結合活性を利用した病原体の捕集に役立つフィルターなどの開発も期待されます。

さらにカイコが産生した繭からは、様々な形状のシルクに加工することができます。糸としての利用以外に、繭を溶かしたシルク水溶液からシルクパウダーやシルクフィルム、シルクスポンジなどを作製することができます(図5)。これまでに抗原特異的な結合活性を保持したシルクパウダーやシルクフィルムの加工に成功しています^{4) 5)}。例えばアフィニティーシルクパウダーは目的タンパク質のアフィニティー精製用担体として、アフィニティーシルクフィルムは様々な検査キットへの応用が可能であると考えられます。

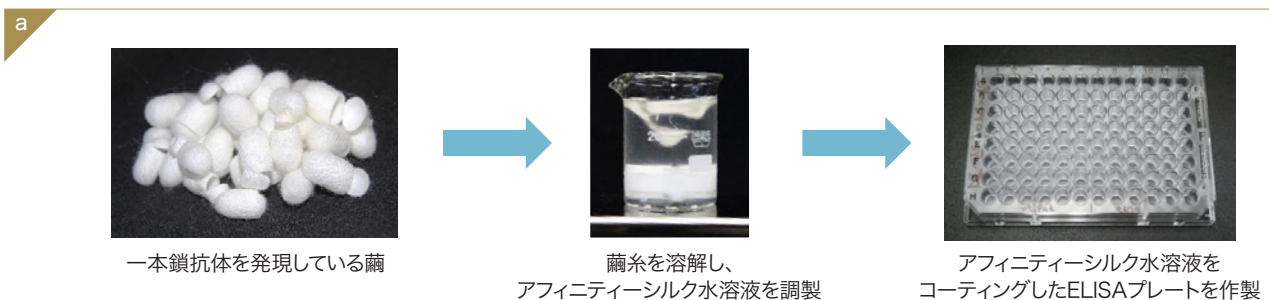
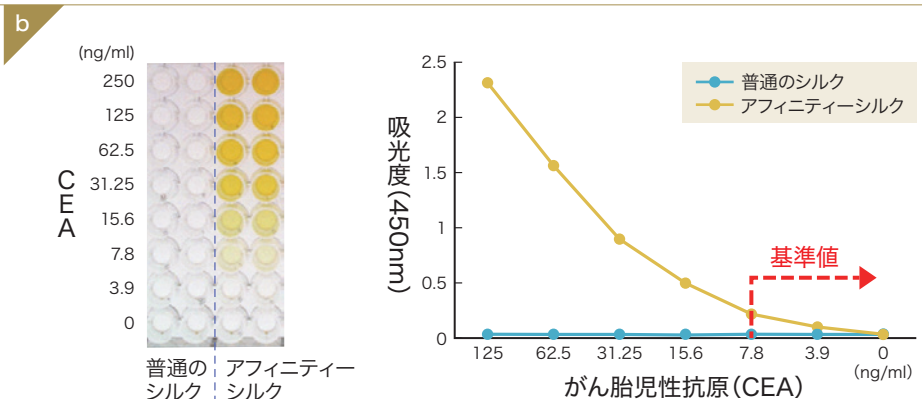
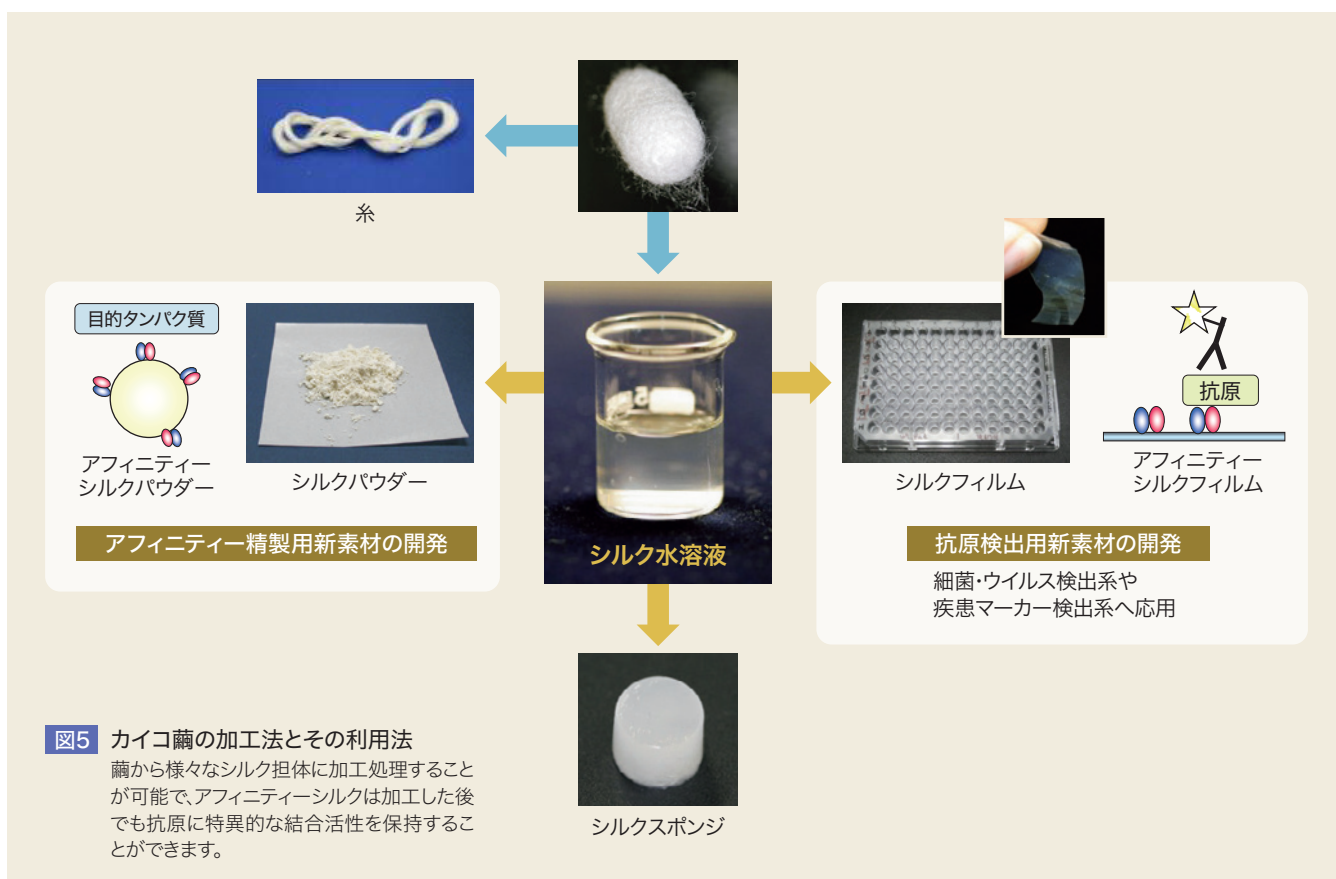


図4
がんマーカーCEAを検出できるアフィニティーシルクの創出
a)アフィニティーシルク水溶液をコーティングしたELISAプレートの調製方法。アフィニティーシルクは精製を必要とせず、繭全体を溶かして利用することができます。
b)アフィニティーシルクをコーティングしたELISAプレートによるCEAの定量試験。基準値の範囲内であれば問題ないとされます。





おわりに

アフィニティーシルクの最大のメリットは低コストで大量に抗体活性を有するタンパク質素材を提供できることです。さらに繭の状態、抗体活性を保持したまま長期保存が可能です。研究室で10年間室温保存した繭においても十分な抗体活性が保持されていることを確認しています。新しい機能性を付加したシルクを生産する組換えカイコの作出およびその利用により、長い歴史と伝統のあるわが国の養蚕業に新たな道を開くことが期待されます。

(生物機能利用研究部門 動物機能利用研究領域)

用語解説

- ※1 **フィブロイン** 絹糸(シルク)を構成する主要なタンパク質の一群です。フィブロインはフィブロインH鎖(>300kDa)、フィブロインL鎖(27kDa)、およびP25/fhx(約30kDa)の3種類のタンパク質から構成され、繊維構造をとります。
- ※2 **抗体** 生体内で異物と認識された分子(抗原)に対して産生されるタンパク質で、その抗原と特異的に結合する能力を有しています。
- ※3 **アフィニティーシルク** 組換えカイコ技術を利用して、シルクタンパク質に直接一本鎖抗体を融合させた新しいシルク素材につけられた名称です。
- ※4 **ELISA (Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay)** 試料中に含まれる目的の抗原あるいは抗体を検出・定量する方法です。特異性の高い抗原-抗体反応を利用し、主に96穴プレートを用いて酵素反応に基づく発色・発光強度を測定します。医療現場でのスクリーニング検査や基礎研究の幅広い分野で利用されています。

参考文献

- 1) Tamura, T. et al. (2000) Germline transformation of the silkworm *Bombyx mori* L. using a piggyBac transposon-derived vector. *Nature Biotechnology*, vol.18, 81-84.
- 2) Bird, R. E. et al. (1988) Single-chain antigen-binding proteins. *Science*, vol.242, 423-426.
- 3) Sato, M. et al. (2017) Development and validation of scFv-conjugated affinity silk protein for specific detection of carcinoembryonic antigen. *Scientific Reports*, vol.7, 16077.
- 4) Sato, M. et al. (2012) Production of scFv-conjugated affinity silk powder by transgenic silkworm technology. *PLoS One*, vol.7, e34632.
- 5) Sato, M. et al. (2014) Production of scFv-conjugated affinity silk film and its application to a novel enzyme-linked immunosorbent assay. *Scientific Reports*, vol.4, 4080.

自動運転田植機の開発

山田 祐一

YAMADA Yuichi

はじめに

高齢化などに伴う農業労働者の減少により、農業現場での労働力不足が深刻化しています。農業現場では時期による繁忙の差が大きく、繁忙期での労働力確保が課題です。特に、稲作における田植は短期間に作業が集中するため、田植え期の労働力不足が顕著化しています。田植え作業は通常、田植機の運転者と苗補給を行う補助者の2名以上で行われますが、運転には熟練技術が必要となるため、代替要員が確保しにくいという現状があります。

近年、こうした問題への解決策として直進アシスト機能付田植機が農業機械メーカー各社から市販化されました。この田植機はGNSS^{※1}の測位情報を基に操舵制御を行い自動直進が可能です。初めに基準となる2点の座標を登録すると、その2点を結ぶ直線と平行に目標線が引かれ自動直進ができます。熟練者の完全な代替には至りませんが、誰でも直進作業が行えるため普及が進んでいます。

農研機構では、このような状況を踏まえ、さらに自動化度合いを高めた自動運転田植機を開発しました。開発した自動運転田植機は、直進作業だけでなく、旋回やほ場全体の経路設計なども自動化できます。作業者が、初めにほ場の外周を手動運転で走行してほ場形状を覚えさせると自動で経路を生成し、それに沿った自動運転が可能です。運転に要する時間を削減でき、人員削減も可能です。

コンセプト

自動運転田植機の基本コンセプトは以下の3つです。1つ目は、ロボット農機で必要とされる安全監視者が苗補



図1 自動運転田植機による1名作業

給者を兼任することで1人1台運用とすることです(図1)。慣行の田植えでは、運転者と苗補給者という2人作業が基本であるため、必要な人員を半減できます。2つ目は、直進と旋回速度および精度を熟練者と同等以上とすることです。誰でも高速・高精度の作業ができるため、農繁期の人員確保が容易になります。3つ目は、事前の経路設計を不要にすることです。パソコンなどで事前に作業計画を立てる必要がなく、ほ場に行けばすぐに使用できます。

次に、自動運転田植機の作業手順を説明します(図2)。

- 1 手動運転でほ場の外周3辺を作業します(ティーチング)。田植機がほ場形状を認識して自動的に走行経路を生成します。
- 2 苗を補給して、リモコンで自動運転開始を指示すると田植機が無人で一往復の作業を行い、畦の3m手前で停止します。ほ場端の形状は必ずしも直線ではなく、障害物もあるため、畦際まで監視者がリモコンを操作して前進させます。
- 3 必要に応じて苗を補給して自動運転を再開すると、2を繰り返して自動で田植えが進められます。なお、作業幅を調節する条止めや空植え行程は必要に応じて自動で挿入されます。

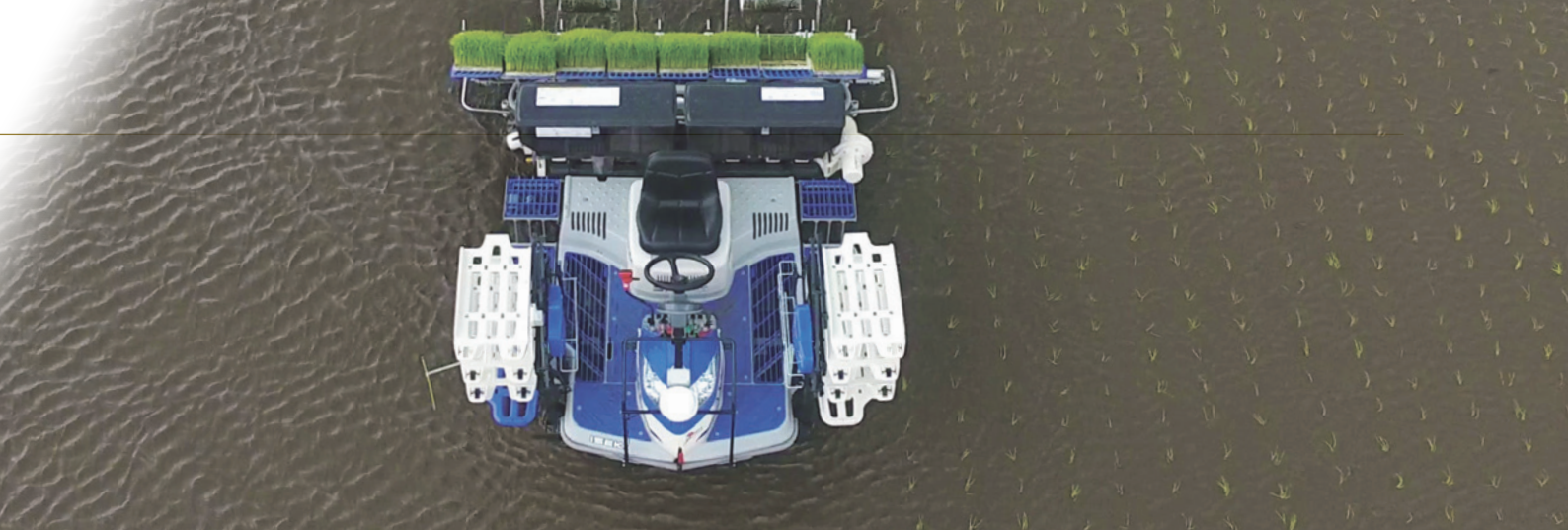
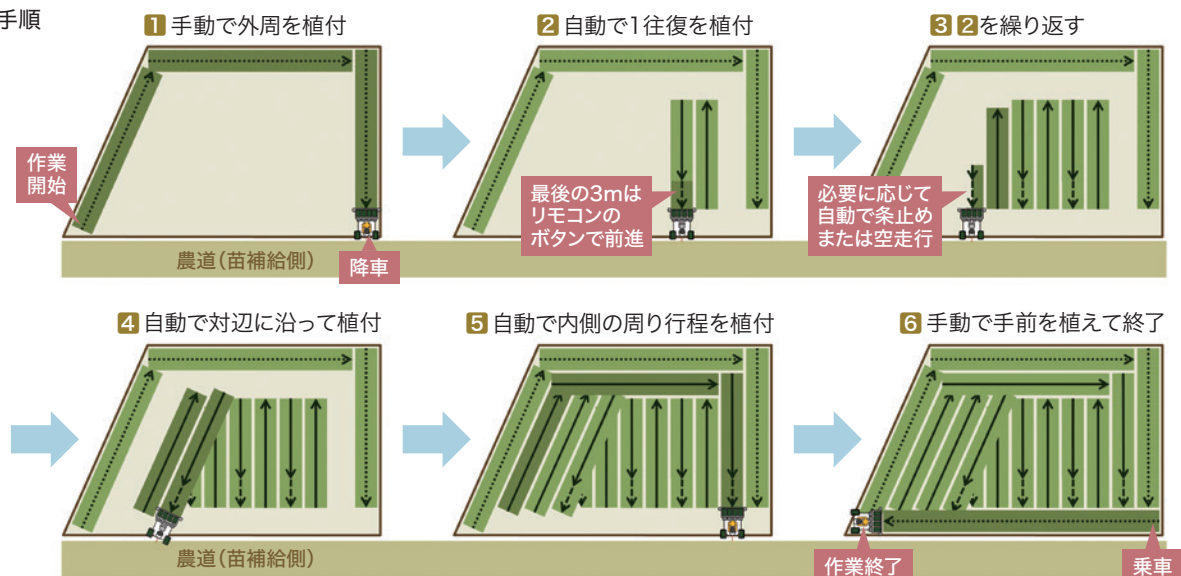


図2 作業手順



- 4 最後の往復行程は対辺に沿って作業が行われます。対辺は必ずしも平行ではないため、この行程で植え残しを防止します。
- 5 往復作業が終わると、ティーチング行程の内側に生じる周り行程を自動運転で作業します。
- 6 最後に苗補給側の一边を手動運転で作業して、田植えが完了します。

システム構成

自動運転田植機は、市販の8条植田植機をベースに開発しました。今回採用した機種は、作業機の昇降、植付クラッチや条止めクラッチのON-OFF、前後進まで電子化されていたため、比較的少ない改造で自動運転に対応でき、市販化時でも大幅なコスト増とはならない見込みです。自動運転のために追加した主な装置は、操舵モーター、操舵ECU^{※2}、GNSS受信機、ナビゲーションECU、リモコン、モニタなどです(図3)。

操舵モーターと操舵ECUは、目標舵角と一致するように田植機の操舵軸を駆動します。操舵モーター(ブラシレスモーター)は、小型かつ高出力で制御性も高いため舵角制御に適しています。操舵ECUは、目標舵角とモーター角度を比較して、ずれを解消すべくモーター電圧を変化させ舵角を制御します。

GNSS受信機には、数センチメートルの誤差で測位が可能でFIX解^{※3}が得られるまでの時間が短い2周波RTK-GNSSを使用しました。田植えでは、行程間隔が狭過ぎると苗の消費量が増えて育苗費用が増大し、広過ぎると雑草の繁茂や栽植密度低下による減収が生じることから、高精度の走行制御が必要となるためです。2周波RTK-GNSS受信機は、開発時には数十万円と高額でしたが、近年数万円の低価格機も発売されています。

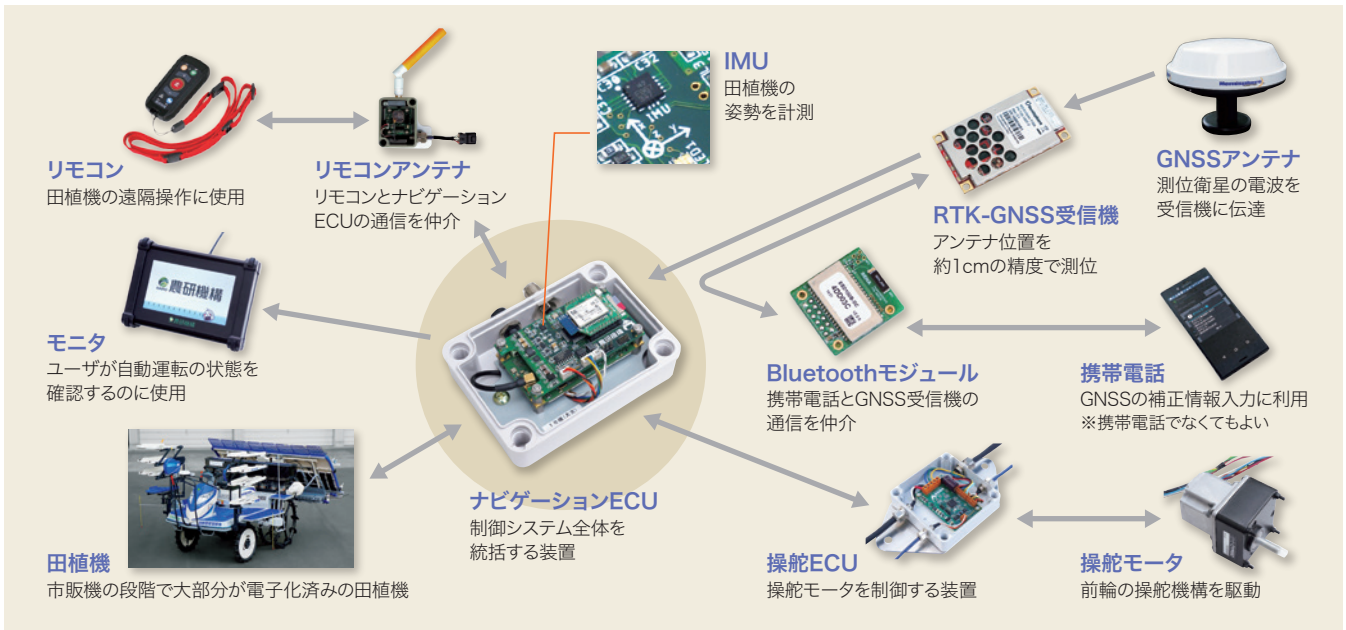


図3 システム構成

ナビゲーションECUは、センサ情報（GNSS受信機の位置情報と速度情報、ECUの基板上に設けたIMU※4の角速度情報と加速度情報）を統合して自動運転を制御するECUです。車両の位置と姿勢を推定して、目標舵角、前後進速度、作業機の昇降、植付クラッチや条止めクラッチのON-OFFといった田植機の操作信号を操舵ECUや田植機本機のECUに送信します。

リモコンは作業者が携帯し、自動運転中に遠隔から作業速度の設定や走行の停止・再開操作を行います。小型・軽量（長辺90mm、質量37g）で、かつシーズン中の電池交換が不要（約200時間使用可能）な仕様としました。リモコンと田植機は常時通信しており、故障などによる通信途絶時にはだたちに田植機を停止させる機能を備えています。

モニタには、田植機の状態や走行経路などが表示され、作業をサポートします（図4）。ティーチング中は、認識した辺の数や途中経過が表示され、作業者はどのよ

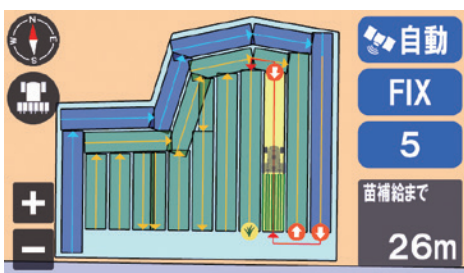


図4 モニタの表示例
青の経路はティーチングによる。

うな経路が生成されるのかを確認でき、ティーチングの失敗を未然に防止できます。経路生成が完了した後は、次に作業する経路がハイライト表示となり、田植機の次の動作を明示します。表示パネルには液晶タッチパネルを使用し、スマートフォンのように操作が可能です。

性能評価

ほ場試験において直進精度を計測したところ、実用上十分な精度が得られました（図5）。走行速度の増加に伴って精度がやや低下するものの、いずれも標準偏差2cm以下に収まりました（図6）。耕盤の凹凸や代かきの状態によって精度は異なりますが、実用上十分であるといえます。

旋回動作（図7）についても実用上十分な速度と精度が得られ、次の行程に問題なく移動することができました。旋回時間は、後退に約3秒、旋回開始から作業機を下ろして植付開始までが約8秒と、計11秒程度でした。これは熟練者と同等であり、常に切り返しなく旋回可能であったことから、旋回速度も実用上十分であるといえます。

自動運転と慣行作業による能率比較を行いました。試験では、自動運転田植機は苗補給も含めて1人、慣行機は熟練運転者1名と補助者1名の2名で行い、取得したデータから1辺100mの正方形ほ場において田植機の最高速で作業した場合の投下労働時間に換算しまし



図5 直進作業結果

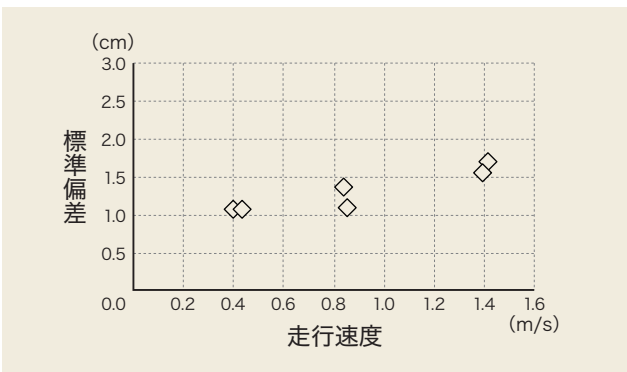


図6 直進精度



図7 自動旋回の様子

た。結果は、自動運転田植機が1.79人時、慣行機が3.18人時となり、44%の削減効果を認めました。

現地実証と改良

自動運転田植機を農研機構の附属農場や多数の農家ほ場で使用し、問題点の抽出と改良を行いました。当初は1台のみでしたが、2019年度に農林水産省のスマート農業実証事業などに向け4台を追加製作し、計5台を稼働させています。

実証などを通じて改良した項目に多角形ほ場への対応があります。開発当初は四角形ほ場限定のプログラムでしたが、これまでに32角形までの多角形ほ場や湾曲

したほ場にも対応できるように改良しました(図8)。変形田であっても自動で走行経路が作成できます。

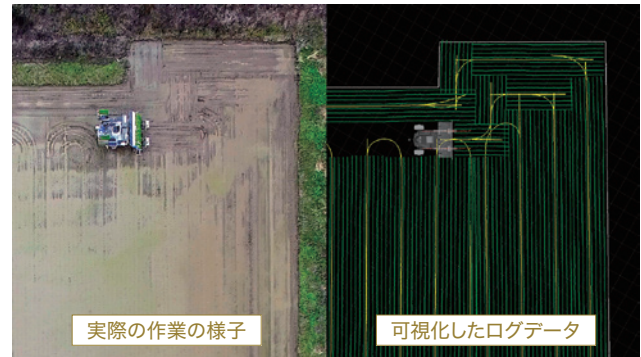


図8 多角形ほ場での作業

おわりに

苗供給者が監視者を兼ねるというコンセプトの下、1人1台運用が可能な自動運転田植機を開発しました。開発機は実用上十分な直進精度や旋回速度が得られ、従来の2名体制と比較して大幅な投下労働時間の削減効果を認めました。現地実証などで問題点の抽出と改良を継続しており、今後は農業機械メーカーなどへの技術移転を進め、市販化に結び付けたいと考えます。

(農業技術革新工学研究センター
次世代コア技術研究領域)

付記:本研究は、2018年度までの内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「次世代農林水産業創造技術」(管理法人:農研機構 生物系特定産業技術研究支援センター)によって実施しました。

用語解説

- ※1 **GNSS (Global Navigation Satellite System) 全球測位衛星システム** GPS、準天頂衛星(QZSS、みちびき)、Galileoなどの衛星測位システムの総称。
- ※2 **ECU (Electronic Control Unit) 電子制御ユニット** 小型コンピュータと各種制御回路をユニット化した装置。
- ※3 **FIX解** 搬送波の整数値バイアスを確定させた誤差数センチメートルの高精度測位を可能とする解。FIX解を得るには電源投入から一定の時間がかかるが、1周波に対して2周波のRTK-GNSSの方がこのFIX解を得るまでの時間が短く、利便性が高い。
- ※4 **IMU (Inertial Measurement Unit) 慣性計測装置** 角速度と加速度を3次元的に検出する装置。この情報を処理して車両姿勢を推定できる。

参考文献

- 1)山田祐一(2018) テクノトピックス 自動運転田植機の開発. 農業食料工学会誌, vol.80(2), 94-97.
- 2)山田祐一(2019) SIP第1期の成果(2)III:自動運転田植機の開発. 農業食料工学会誌, vol.81(6), 349-352.

農業用水路から流水熱を取り出す！

三木 昂史 後藤 眞宏

MIKI Takashi

GOTO Masahiro

はじめに

私たちの快適な生活は、電気や熱などのエネルギーを使うことにより支えられています。化石燃料を消費することで電気や熱が作り出される一方で、二酸化炭素などの温室効果ガス（GHG）が大量に排出され、気候変動問題の主な原因となっています。気候変動問題への関心が高まる中、わが国も、2050年までのカーボンニュートラル実現や再生可能エネルギーの主電源化などに向けた議論が活発になっています。

2015～17年の日本国内における1年間の全産業の最終エネルギー消費量は平均で約1,346万TJ（テラ・ジュール、テラは10の12乗）と報告されています¹⁾。このうち、最終エネルギー消費総量に占める割合が約43%と大きい製造業では、工場からの排熱などの熱を有効に使うことで脱炭素や省エネルギーなどの課題解決に貢献可能と言われています²⁾。一方、農林水産業では、最終エネルギー消費量全体に占める割合は約2%で、農業はその約68%を占めており、ほとんどが化石燃料の消費に起因しています（図1）。例えば、施設園芸の暖房などの環

境制御で化石燃料が消費されており、農林水産業における温室効果ガス排出の約30%（農業分野のみでは約11%）を占めています³⁾。農業分野における脱炭素や省エネルギーの課題を解決するためには、化石燃料の利用削減に取り組む必要があり、そのためには、化石燃料から再生可能エネルギーに置き換えていくことが重要です。

ヒートポンプシステムを使った熱エネルギーの利用

再生可能エネルギーというと、太陽光発電や風力発電などによる電気エネルギーを連想されると思いますが、地中熱や地下水熱などの熱エネルギーも、活用が期待される重要な再生可能エネルギーです。熱エネルギーを効率的に集める技術であるヒートポンプシステムによって、地中熱や地下水熱は熱源となる地中や地下水中から汲み上げられ、暖房や冷房、給湯などの用途で利用されており、2000年代以降、導入が進んでいます。ヒートポンプシステムの特徴は省エネルギーであることです。例えば、電気ストーブは投入した電気エネルギーに対して、等倍の熱エネルギーしか得ることができませんが、ヒートポンプシステムでは投入した電気エネルギーに対して、投入したエネルギーの3～6倍の熱エネルギーを熱源から汲み上げることができます（図2）。熱源は、地中や地下水だけでなく、ため池の水のような地表水を使用することもできます。地中や地下水、地表水を熱源にしたヒートポンプシステムは、空気を熱源にするヒートポンプシステムと比較して、効率的に熱を汲み上げて施設に利用できることがこれまでの研究で示されています^{4) 5)}。

日本は水資源が豊富であり、農業にも大量の水が使

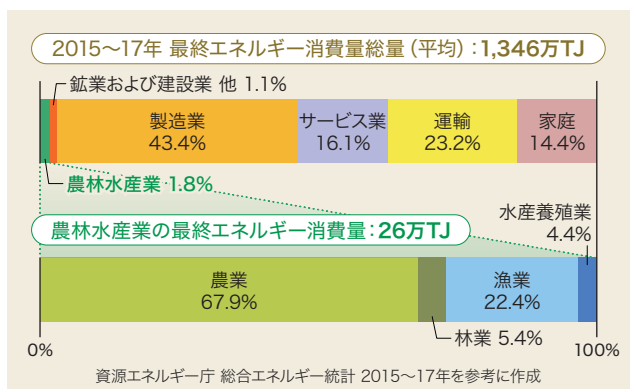


図1 わが国における最終エネルギー消費量

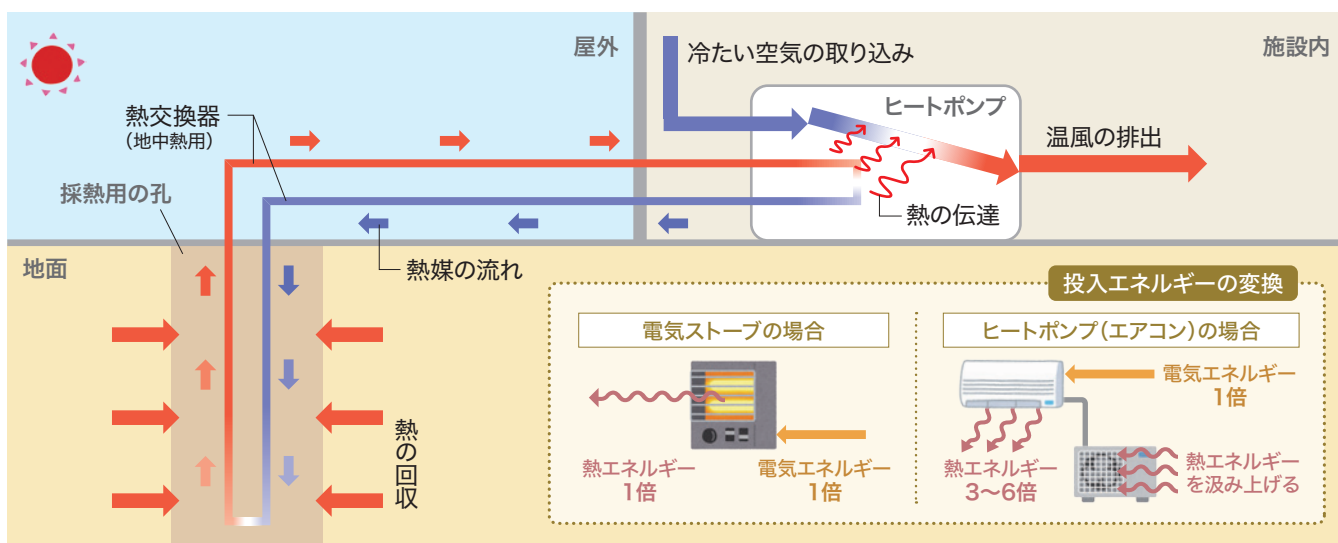


図2 地中熱ヒートポンプシステムの仕組み(暖房運転の例)

用されています。農業用水が流れる水路は幹線水路だけで約5万kmも整備されており、農業用水路の流水を熱源として、熱を取り出すことができれば、流水熱も脱炭素および省エネルギーへの貢献が期待できます。しかし、これまでの水熱源は、地下水やため池などの流れが非常に遅い条件(数cm/day~数百m/day)もしくは静水条件を対象とした事例が主流でした。本稿では、地下水と比較して、農業用水路のように流れが速い条件下(2m/min以上)を対象に、流速条件や設置方法の違いによる流水条件下の熱交換特性を評価した結果⁶⁾を紹介します。

取り出し、その熱をヒートポンプから温風として吹き出します。シート状熱交換器は、幅0.9m、長さ5.6mであり、外径6.0mmの硬質ポリエチレン管117本が並列しています(図3)。熱交換器の熱媒には、不凍液を使用しました。このようなヒートポンプシステムを農村工学研究部門(つくば市)の実験棟内に造られた農業用水路と同規模の実規模水路模型(幅1.6m、側壁高1.6m、長さ15m)に設置しました(図4)。水路の水深を1.3mに設定し、熱交換器がすべて水に浸かる条件下で本実験装置を用いて流水条件下の熱交換特性を計測しました。

流水用ヒートポンプシステム

開発したシステムはヒートポンプとシート状熱交換器で構成しました。この流水用ヒートポンプシステムでは、例えば、暖房運転の場合、水路の水温より低い温度の液体(熱媒)を熱交換器内に流すことで、流水から熱を

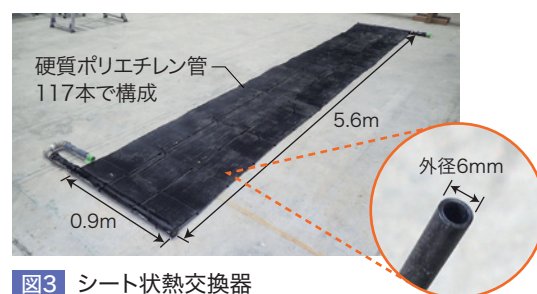


図3 シート状熱交換器

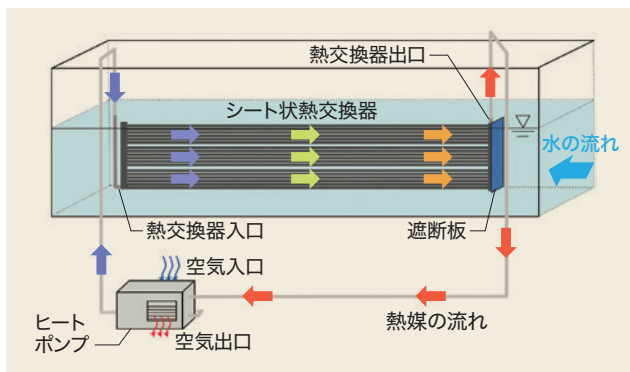


図4 ヒートポンプシステム(暖房運転の例)

ゴミの衝突機会を少なくし、水路の通水機能を大きく阻害しないために熱交換器を水路の側面に設置することが望ましいです。水路床に熱交換器を水平に設置することも可能ですが、石などの流下物が床付近を流れることによる熱交換器の破損の恐れ、熱交換器へのゴミや土砂の堆積から水路床には設置しない方がいいと考えます。なお、水深が浅くなり、熱交換器が空気中に露出すると、熱通過率は低下するので注意が必要です。

流水条件下の熱交換特性

熱交換特性は、熱交換器が流水と熱を交換する能力であり、熱通過率^{*1}として評価しています。熱通過率が高いほど、熱を効率よく流水から取り出せることを意味します。

シート状熱交換器を水路中央に設置した条件下で、ヒートポンプシステムを冷房運転させると、熱通過率は水路内流速の増加とともに増加しました(図5)。また、熱媒の流量の増加によっても熱通過率は増加しますが、流速による影響と比べて大きく増加しませんでした。したがって、流水熱の利用を計画する際、水路内の流速に注目することが重要です。ヒートポンプを暖房運転させた場合でも冷房時と同じような結果となりました。

実際の水路では、ビニール袋やペットボトルなどの生活ゴミ、落葉、刈草、石、場所によっては動物の死骸などが流れてくることがあります。そこで、これら流下物が熱交換器に衝突する可能性を低くするとともに、流下物

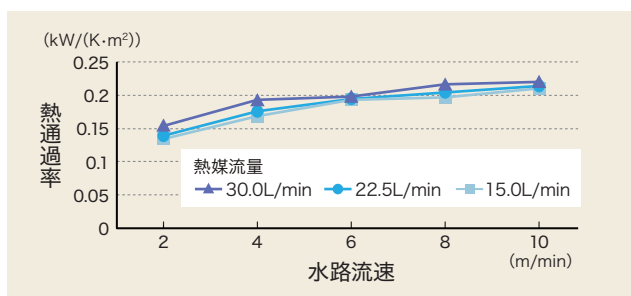


図5 異なる流水条件下での熱通過率(冷房運転)

が水路と熱交換器の間に挟まることで障害物となり、水の流れを阻害することを防ぐために熱交換器を水路側壁に設置しました。また、シート状熱交換器の表面を保護するための金網(エキスパンドメタル、以下EM)をシート状熱交換器と一体化させ、EM上流端は水路側壁に沿わせるために斜めに屈曲させました(図6a)。EM上流端に流下物の付着が想定されることから、EM上流端に遮断板を付ける施工方法を考案しました(図6b)。この条件下で熱交換特性を計測すると、一般的な用水路の流速条件となる27m/min以上において、EM無しと同程度の熱通過率を得られることがわかりました(図7)。水路の側壁と熱交換器の間隔は、110mmのときに最大の熱通過率を得られました。また、上流端遮断板の有無にかかわらず、ほぼ同じ熱通過率を得られたことから、ゴミ流下対策として遮断板の設置が望まれます。

流水条件下にシート状熱交換器を設置できれば、熱通過率は0.242kW/(K·m²)であり、静水条件下0.100kW/(K·m²)の約2.5倍、土中設置0.017kW/(K·m²)の約15倍、従来型スリンキー式熱交換器の土中設

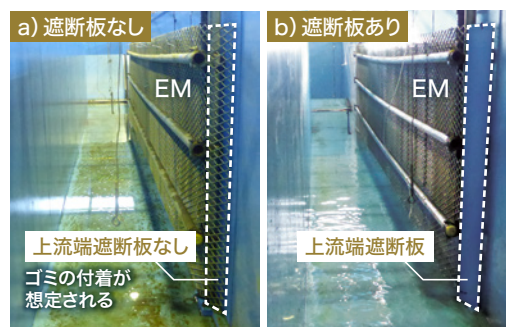


図6 熱交換器の施工方法

水路内の水を抜いて上流側より撮影。撮影のため、熱交換器は稼働させていません。

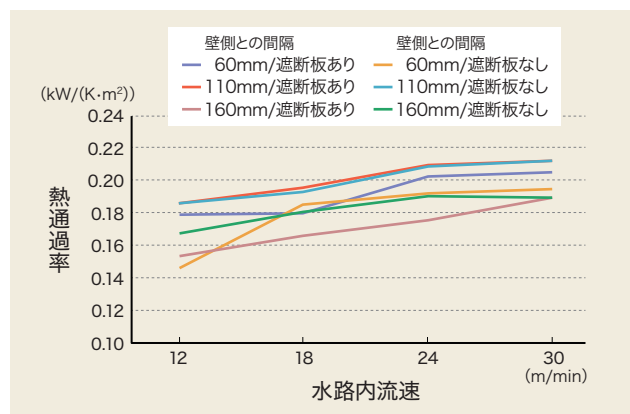


図7 EMIによって保護した熱交換器の熱交換特性

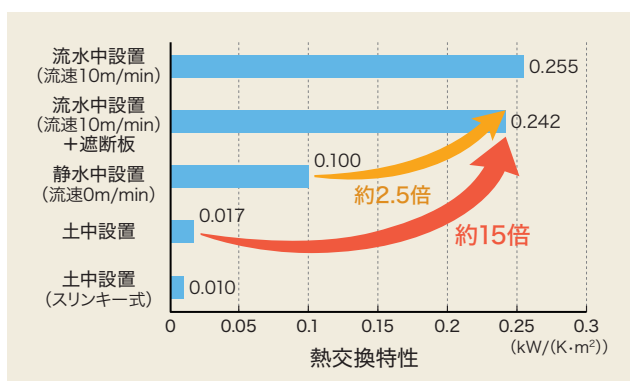


図8 熱交換特性の比較

置0.010kW/(K·m²)の約25倍の高い性能が得られることがわかりました(図8)。シート状熱交換器を流水中に設置すると、熱交換器表面で流水と常時、熱交換されるため、高い熱通過率が得られたと考えられます。

流水熱のメリット・デメリット

化石燃料を使用する施設園芸のボイラーをヒートポンプシステムで置き換えると想定した場合、重油や灯油などの燃料代からヒートポンプを稼働させる電気代に変わるため、ランニングコストが変動しにくくなるとともに、二酸化炭素の排出量の減少などがメリットとして挙げられます。デメリットとしては、水熱源ヒートポンプと熱交換器のインシヤルコストが高価である点が挙げられます。

流水熱を地中熱と比較すると、地中熱は採熱用の孔(ボアホール方式、直径0.1~0.2m、深さ100~200m)を掘削しなければならず、熱交換器の設置コストが高くなっていました。本成果のように流水中にシート状熱交換器を設置できれば、ボアホール方式における熱交換器の設置コストを約50%に抑えられます。

水路に導入する際の注意

農業用水路にヒートポンプシステムを導入する場合、あらかじめ水路管理者である土地改良区や水利組合に相談する必要があります。EMと一体化したシート状熱交換器を水路側壁に設置し、上流端遮断板を設けることでゴミの付着を防げるものの、長期間水路内に熱交換器を設置していると、ゴミは少なからず付着し、熱交換への

の影響や水路の流れの阻害などの問題が生じると考えられます。そのため、流水熱利用を目的とした水路利用者は、水路管理者に労力や心理的負担を生じさせないよう、設置の手続き、日々の管理方法などについて十分な話し合いをすることが特に重要です。

おわりに

カーボンニュートラルや脱炭素などの目標を達成するには、資源を有効に利用する必要があり、流水熱の利用によって、省エネルギーや二酸化炭素の排出量の削減などの効果が期待できます。流水熱を利用したヒートポンプシステムは、将来的には施設園芸の冷暖房など農業分野に留まらず、商店や民家などでも利用可能であると考えています。

農業用水路は全国に敷設されており、規模や水深、流速は場所により異なります。本成果では、比較的規模の大きな水路を対象としました。今後は水位が低い小規模な農業用水路を活用した流水熱の研究を進め、幅広い分野で普及できるよう取り組んでいきます。

(農村工学研究部門 地域資源工学研究領域)

付記：本成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務「地中熱・流水熱利用型クローズドシステムの技術開発」(平成26-30年度)で得られたものである。

用語解説

※1 **熱通過率** 熱交換器で汲み上げた熱量を熱交換器内外温度差(K:熱交換器内側の熱媒温度と水路の流水温度の差)で除した熱交換率(kW/K)を算定し、熱交換率を熱交換可能な熱交換器の面積で除した値。単位は(kW/(K·m²))。

参考文献

- 1)資源エネルギー庁(2020) 総合エネルギー統計。
http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2 (参照 2021-1-29)
- 2)内山洋司(2021) “産業電化”による省エネ・脱炭素イノベーションの実現。エネルギー・資源学会誌, vol.42(1), 25-29.
- 3)土屋遼太ら(2019) 温室効果ガスインベントリに基づく農業由来の温室効果ガス排出の現状。農業施設, 第50巻(3), 19-27.
- 4)奥島里美ら(2016) 表層水および浅層地中を熱源とした温室暖冷房用ヒートポンプシステムの運転事例。農工研技報, 218, 39-50.
- 5)O. Büyükalaca, et al. (2003) Experimental investigation of Seyhan River and dam lake as heat source-sink for a heat pump. Energy, vol.28, 157-169.
- 6)後藤真宏ら(2018) 流水中に設置したシート状熱交換器の熱交換特性と農業用水路への設置方法。農研機構報告, 農村工学部門3, 29-41.
- 7)相澤正樹ら(2012) 施設園芸における水熱源式ヒートポンプの利活用。農水省技術会議の新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業(21058)「低炭素時代に向けた自然エネルギー利用率を最大限に高める施設栽培用ヒートポンプシステムの開発」研究グループ。

超音波を利用した 新たな物理的防除技術

中野 亮

NAKANO Ryo

はじめに

農業における今後の重要課題は、世界の人口増加を支える食料の増産であると言われています。世界の総人口は2050年までに98億人を超えることが国連により試算されており、食料生産を2倍に増やさなければ大規模な飢饉が発生する可能性があると言われています。しかしながら、食料の生産に利用可能な土地を今以上に増やすことは容易ではなく、食料増産には現在の農地における生産性をさらに向上する必要があります。振り返ってみると、ほんの100年前まで、人類は病害虫の多発による飢饉に度々見舞われていました。その後農薬を多用するようになり、安定した農業生産を達成するに至りました。農薬は単価が比較的安く、病害虫の防除に卓越した効果を発揮しました。ですが、過度に使用することで生態系のバランスを崩すほか、化学合成殺虫剤が効かなくなる、いわゆる抵抗性を害虫個体群に付与する負の影響ももたらしています。殺虫剤抵抗性は世界規模で大問題となっており、長い期間と莫大な費用をかけて新しい殺虫剤を開発するサイクルでは立ち行かなくなってきています。そこで、将来にわたる生産性向上のためにも農薬のみに依存しない害虫防除体系として、主に物理的防除・化学的防除・生物的防除・耕種的防除を組み込んだ総合的害虫管理の取り組みが重要となっています¹⁾。本稿では、その中でも新規の物理的防除手段である、合成超音波を用いたチョウ目害虫の防除技術について概説します。

チョウ目害虫と超音波

夜に活動する昆虫は、超音波を用いたエコーロケーション（反響定位）を発達させているコウモリによって大量に捕食されています²⁾。超音波とは、ヒトが音として認知できない、周波数が約20kHz以上の高い音（大気中を1秒間で2万回以上振動する音）と一般に定義されています。エサの探索から捕食において、周波数が30～60kHz、パルスの長さが1～12ms、反復率（1秒当たりのパルス数）が8～130Hzの超音波を発するアブラコウモリをはじめとする食虫コウモリは、動き回る虫から跳ね返ってくる超音波のエコーを検知し、その位置を精度よく把握して虫を捕えています。これに対し、昆虫のうち耳を持つものは、超音波をコウモリの存在と接近を知る手掛かりとして活用します。ヤガなどのチョウ目害虫の多くは、コウモリの発する超音波を感知すると、逃避などの防衛行動を引き起こします³⁾（図1）。ソフトウェアなどで合成した超音波によっても逃避を引き起こすことが可能なため、チョウ目害虫が生産ほ場などに飛来すること

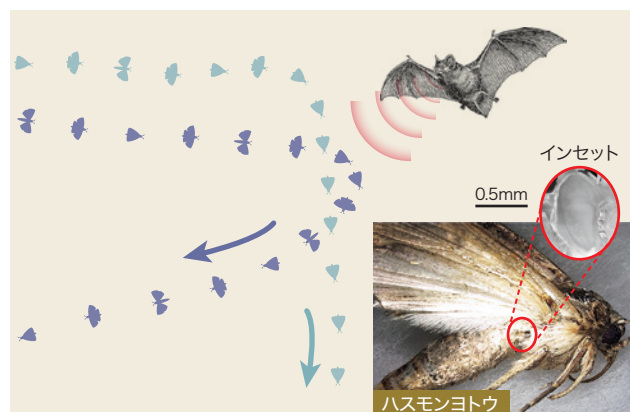


図1 食虫コウモリの超音波から逃げるチョウ目害虫の飛行経路の例
インセットはハスモンヨトウの後翅の基部付近にある鼓膜器官(耳)



図2 イチゴ葉上のハスモンヨトウの卵塊(矢印)および孵化幼虫の被害(左上)と中齢幼虫(矢印;右上)、ネギ葉上のシロイチモジヨトウの卵塊(矢印;左下)と中齢幼虫(矢印;右下)

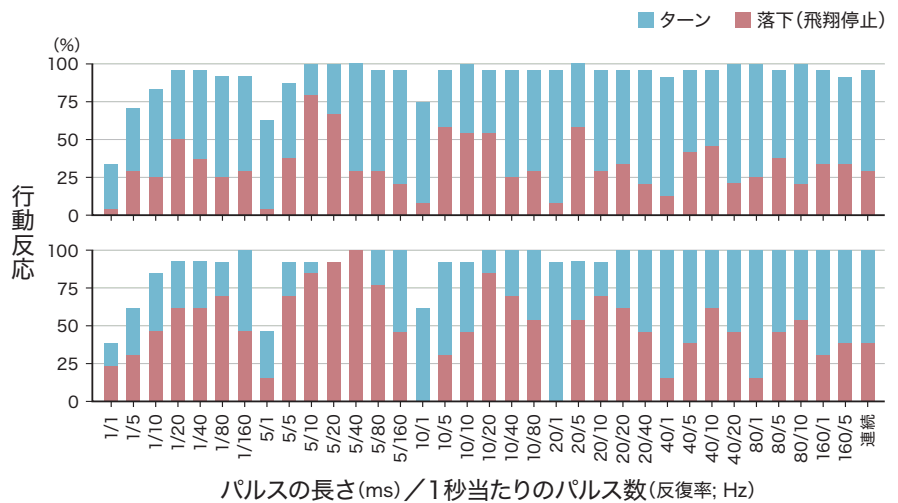


図3 飛翔するハスモンヨトウ(上)とシロイチモジヨトウ(下)が高い割合で逃避(ターンと落下)する超音波の時間構造

を防ぐことを目的として、超音波による防除技術の開発が進められています。

1960年代以降、アメリカを中心に、合成超音波の防除利用が検討されてきました。トウモロコシ栽培におけるヨーロッパアワノメイガには周波数50kHz、アブラナ科作物のイラクサギンウワバには20kHz、ワタなどのアメリカタバコガには25~30kHzの合成超音波を用いた防除試験がなされました⁴⁾。対象害虫の産卵率や幼虫数の減少が確認された例もありましたが、効果がなかった研究もありました。いずれにせよ、周波数が20kHz以下の可聴音よりも大気中の減衰が大きい超音波の利用は、アメリカのような広大な露地栽培ほ場には不向きと考えられ、近年は活発な研究が実施されていません。日本では、果実の重要害虫である吸蛾類(エグリバなど)の防除に周波数40kHzの合成超音波を利用した技術開発がなされ、農業生産現場における害虫忌避効果とそ

の有用性が実証されています。しかしながら、その防除効果はスピーカーを2~3m間隔で密に設置した場合であり、導入コストの面から実用化には至っていません⁵⁾。

本研究では、被害面積と被害作物が広範なハスモンヨトウと、近年になって被害が再興しているシロイチモジヨトウを対象として(図2)、超音波を用いた物理的防除技術を開発しました。両種は台風などの風に乗って長距離を移動する性質を持ち、盛夏以降に大発生し、大きな被害をもたらすことがあります。これら害虫のほ場への侵入を防ぐため、水平方向の全方位に超音波を出力可能なスピーカーを用い、ほ場への侵入経路が限定される栽培施設、および侵入経路が限定されない露地ほ場での利用を検討しました。

種によって超音波の周波数に対する感受性は異なるため⁶⁾、10~80kHzの広帯域の周波数成分からなる超音波(優占周波数が約20~50kHz)を使用しました。

ほ場試験に先立ち、飛翔行動を効率的に阻害する時間構造（超音波パルスの長さなど）と音圧を実験室内にて精査しました。その結果、両種はともにパルス長が5ms前後、反復率が10および20Hz、鼓膜の位置で64dB peSPL (peak equivalent sound pressure level = 持続時間の短い音の最大振幅値を同じ振幅値の持続純音の音圧レベルで表した物; re.20μPa) 以上の音圧となる超音波パルスから逃げる頻度が高いことを明らかにしました⁷⁾ (図3)。

栽培施設におけるハスモンヨトウの防除

土耕促成栽培イチゴの栽培施設（単棟5ハウス）を試験ほ場とし、並列する5ハウスの両端のハウスに超音波スピーカーを2台ずつ、側窓の高さに合わせて施設内のパイプ資材から吊るしました (図4左)。育苗ほから本ほへの定植後の9月上～下旬に超音波スピーカーを設置し、ハスモンヨトウが卵を産みに飛来する夜間に超音波パルスをハウスの外側に向けて照射しました。超音波スピーカーを設置しない条件と設置・稼働した条件で、栽培施設内全体に産みつけられたハスモンヨトウの卵塊数を比較しました。

卵塊数は、超音波スピーカーを設置した条件で少数となりました。装置の無設置ほ場で5週の積算で10a当

たり185卵塊を発見したのに対し、設置条件では6週間で8.2卵塊以下となりました¹⁾⁷⁾ (図5)。超音波スピーカーを設置したほ場では、無設置条件と比較して卵塊数は95%以上少なくなった計算になります。授粉のためにミツバチをハウス内に放飼するため、防除対象害虫以外の昆虫への悪影響が懸念されましたが、イチゴの着果数や果実形態に異常は見られませんでした。一方、主要害虫のナミハダニやヒラズハナアザミウマに対しては、超音波による明確な被害の抑制は認められませんでした。

露地ほ場におけるシロイチモジヨトウの防除

シロイチモジヨトウは前述のハスモンヨトウと近縁な種で、ネギへの被害が顕著に多いことが知られています。盛夏以降は1～2週間隔で殺虫剤を散布しないと壊滅的な被害により、ほとんど収穫できないほ場も出てきます。葉ネギなどでは可食部である葉を中心に幼虫が食害することから、防除圧が必然的に高くなりますが、殺虫剤抵抗性の獲得を回避するためにも新規の防除技術が求められていました。

露地栽培においては、上空からのシロイチモジヨトウの飛来を想定し、ほ場の四隅に立てた支柱の先端部に「くの字型」となるようスピーカー2台を連結させました



図4 有機圧電フィルムの特性を利用して開発した円柱型の超音波スピーカー
イチゴ栽培施設（茨城県つくば市・佐藤武史氏）のパイプ資材から吊るした場合（左）とネギ露地ほ場（千葉県松戸市・平川嘉一氏）に「くの字型」で設置した場合（右）

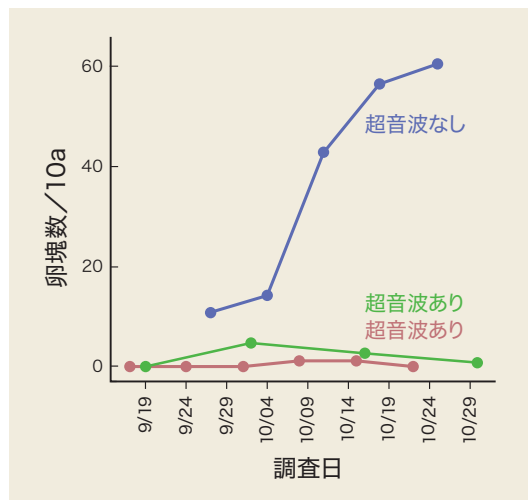


図5 イチゴ栽培施設での合成超音波によるハスモンヨトウ卵塊数の低減効果

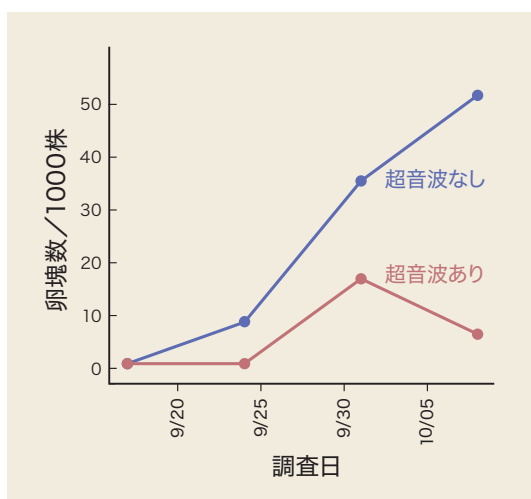


図6 ネギ露地栽培ほ場での超音波によるシロイチモジヨトウ卵塊数の低減効果

(図4右)。これにより、一組のスピーカーではほ場の外側の斜め上方向にも超音波パルス照射ができます。ハスモンヨトウの場合と同様に卵塊の数で防除効果を比較しました。超音波スピーカー無設置のほ場と比較し、夜間に超音波を照射したほ場における卵塊数は、68%少なくなりました¹⁾(図6)。試験地は強風に晒されやすい露地ほ場であり、交尾を終えたメス成虫の一部が風に飛ばされてほ場に侵入した可能性もあります。そのためか、直接の比較はできませんが、イチゴの栽培施設におけるハスモンヨトウを防除対象とした試験(図5)よりも産卵抑制率は高くありませんでした。しかしながら、メス成虫による産卵のためのほ場への自力飛翔は、合成超音波で阻害できたと推察されます。

上記の調査は長ネギほ場で実施したのですが、葉ネギほ場でも試験を実施しています。そこでは、超音波スピーカー無設置のほ場と比べ、幼虫数と被害株数はそれぞれ90%以上少なくなりました。これに伴い、シロイチモジヨトウに対する殺虫剤散布回数は、超音波スピーカーの設置により、80%以上の大幅削減を可能にしました。ネギアザミウマとネギハモグリバエの被害軽減は確認されませんでした。シロイチモジヨトウの発生量が多い場合には、合成超音波は特に有効であると考えられます。

おわりに

耳を持つチョウ目害虫が、天敵であるコウモリの超音波から逃れる行動習性を利用した物理的防除技術は、環境への負荷の低い新たな防除技術として実用化を進めています。これまでの室内行動試験では、ツマジロクサヨトウやカブラヤガなどのヤガ類や吸蛾類であるエグリバ類、米穀物の貯蔵品・加工品の害虫であるノシメダラメイガなどのメイガ類、アワノメイガなどのツトガ類の飛翔を合成超音波で阻害できることを確認しています⁸⁾。合成超音波を用いた防除技術が、温暖化などに関連して全般に被害が増加傾向にあるチョウ目害虫の防除に苦慮する生産者の一助となることを望みます。今後の適用拡大、さらにはスマート農業との連携も大いに図っていきます。

(果樹茶業研究部門 生産・流通研究領域)

付記：本稿で紹介した研究は、内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム(次世代農林水産業創造技術)」「持続可能な農業生産のための新たな総合的作物保護技術の開発」(管理法人：農研機構生研支援センター)のうち、「紫外光照射技術を基幹としたイチゴ病害虫の新防除体系の開発」および科学研究費(17K07581)の支援を受けて実施しました。ほ場試験に使用した有機圧電フィルムを用いた超音波発生装置は、株式会社メムス・コアおよび東北学院大学が共同で開発したものです。

参考文献

- 1) 森直樹ら(2021) 農業とバイオミメティクス. In: バイオミメティクス・エコミメティクス—持続可能な循環型社会へ導く技術革新のヒント—, 下村政嗣(ed), シーエムシー出版, 40-46.
- 2) Boyles, J. G. et al. (2011) Economic importance of bats in agriculture. *Science*, vol.332, 41-42.
- 3) Nakano, R. et al. (2015) Moth hearing and sound communication. *Journal of Comparative Physiology A*, vol.201, 111-121.
- 4) 中野亮(2012) チョウ目害虫における超音波を用いた行動制御技術. *植物防疫*, vol.66, 300-303.
- 5) 小池明(2008) 超音波を利用した果樹のヤガ類被害防止技術の開発. *植物防疫*, vol.62, 549-552.
- 6) Nakano, R. and Mason, A. C. (2017) Hearing sensitivity is more relevant to acoustic conspicuousness than to mechanical constraints in crambid moths. *Biological Journal of the Linnean Society*, vol.121, 174-184.
- 7) 中野亮(2019) イチゴ施設栽培における超音波を活用した防蛾技術. *植物防疫*, vol.73, 680-683.
- 8) Nakano, R. and Mason, A. C. (2018) Early erratic flight response of the lucerne moth to the quiet echolocation calls of distant bats. *PLoS ONE*, vol.13, e0202679.

判断の根拠を可視化できるAIを開発 — 生産者も納得の病虫害診断に活用 —

ハバラガムワ ハルシャナ

HABARAGAMUWA Harshana

大石 優

OISHI Yu

はじめに

病虫害による農作物への被害は深刻でその対策を支援するために、AI (Artificial intelligence: 人工知能) を活用した病虫害の自動判別システムの開発が進められています。現在、AIによる画像解析のアルゴリズムに使われている深層学習^{*1}のほとんどは、モデルが学習した特徴や、学習に基づく判断の根拠を説明することが困難です。深層学習の利用場面が広がる中で、例えば人間の意思決定の参考にする場合など、判断の根拠が必要となるケースが次々として出てきており、判断の根拠を説明可能なAI (Explainable AI: XAI) への社会的要請が強まっています。そこで今回、モデルの判断の根拠として、判定に使用した特徴を可視化できる深層学習モデルを開発しました。

開発した手法は、画像解析における画像の内容に関する判断をする画像認識処理の際の画像分類のための深層学習モデルで、変分オートエンコーダ (Variational Autoencoder: VAE)^{*2}という技術を用いて、学習した特徴を可視化することができます。利用者が判断の根拠を確認できることで、本手法を組み込んだシステム全体の信頼度向上につながるだけでなく、モデルの改良方針の決定にもつながります。さらに、分類の専門家の経験の可視化や、分類の専門家が気づかなかった分類基準の創出にも役立つ可能性があります。

本稿では、バレイショの葉の病気の発症の有無を画像から判定することに応用した事例を紹介しますが、本手法は今後、病虫害の診断に限らず、農業分野を始め根拠が説明できる画像分類モデルが必要な、幅広い分野での活用が期待されます。

画像分類

本手法は画像分類のための深層学習モデルですので、まず初めに、適用対象である画像分類について説明します。

ヒトは経験に基づいて画像に写っているものが何であるかを認識することができます。一方で、コンピュータはドローン搭載カメラ、スマートフォン、ウェアラブルカメラ、一眼レフカメラなど様々な画像センサで撮影して得られたデジタル画像を画像処理により、画像の内容に関する判断である画像認識を行います (図1)。画像認識

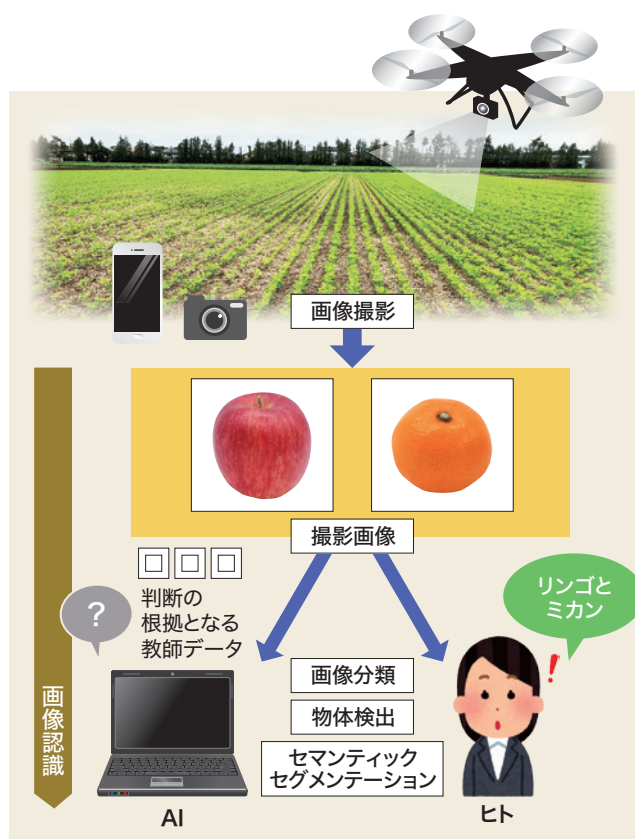


図1 デジタル画像と画像分類



のための主なタスクとして画像分類があり、その他には物体検出やセマンティックセグメンテーション^{*3}などがあります(図2)。一般的なデジタル画像はコンピュータにとって、画素ごとに(赤、緑、青) = (155, 45, 35)といった0~255の数値が並んでいる3次元配列です。コンピュータで画像分類をする際には、これらの数値の関係性(特徴)を数式で表現し、与えられた対象候補のうちのどれに当てはまるかを判別し、画像に写っているものが何であるかの分類結果を出力します。しかし、実社会において求められるタスクは複雑であり、それらをすべて数式で表現することは容易ではありません。そのため、本手法では深層学習を用いています。

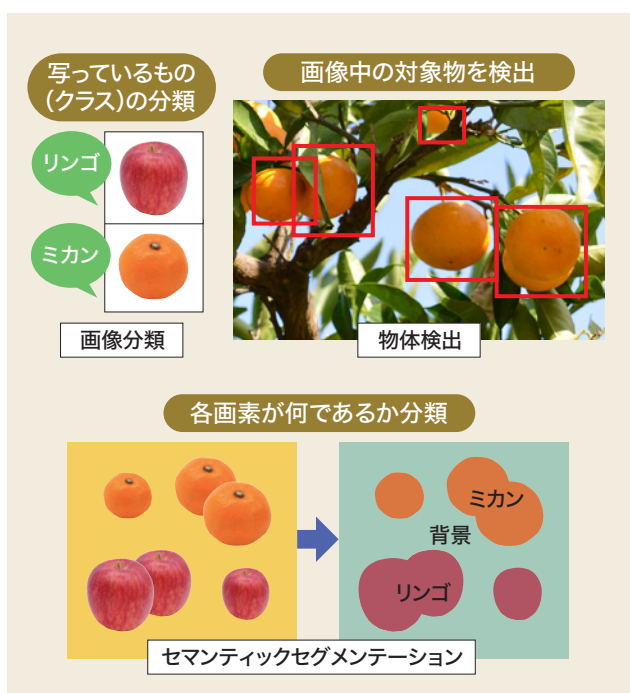


図2 画像分類は画像認識のための主なタスクの一つ

開発手法

教師あり深層学習は、予め用意した画像データセット(画像と、画像に写っているものが何であることを示した「ラベル」からなるデータセット)から、それらを分類するのに必要な特徴と閾値を自動的に決定する方法で、この処理を「学習」と言い、このときに使用した画像データセットを「教師データ」と言います(図3)。教師あり深

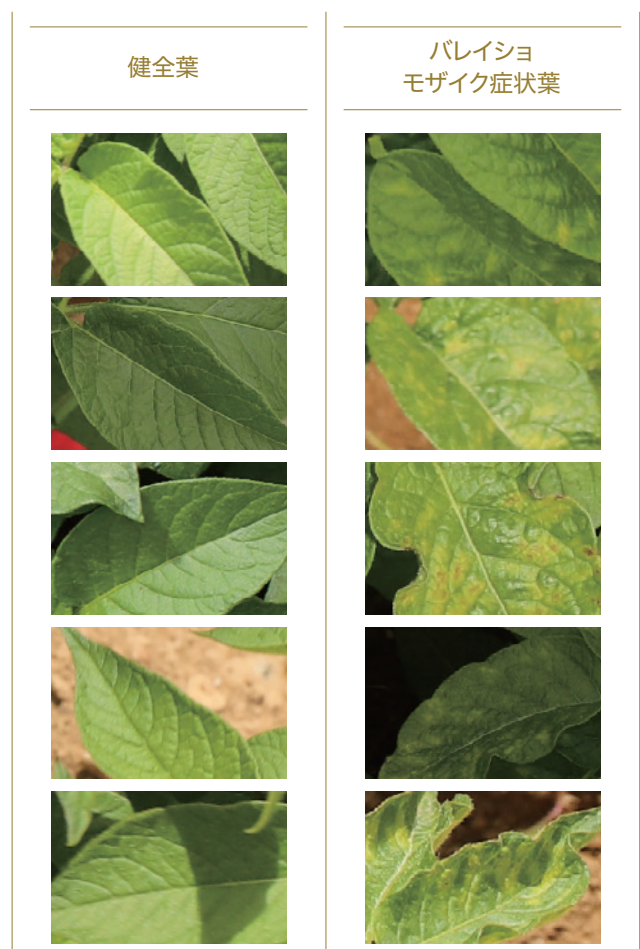


図3 画像データセット
(パレイショモザイク症状葉、健全葉の2クラス)



図4 学習済みモデルを用いた病葉診断

層学習では画像データセットを教師データとして使い、学習によってできた「学習済みモデル」を得ます。新たな画像に対して学習済みモデルを適用することで、自動で画像を分類することができます(図4)。さらに本手法では、モデルが分類に使用した特徴を可視化するために次のような手法を見出しました(図5)。具体的には、まず対象となる画像を情報圧縮します。この際、圧縮された情報(特徴)を①病葉の特徴、②健全葉の特徴、③葉自体の特徴に分離します。そして情報復元(画像生

成)する際に、健全葉と葉自体の特徴②と③のみを用いることで健全葉画像を生成し、病葉と葉自体の特徴①と③のみを用いることで病葉画像を生成することができます。モデルが学習した「健全葉」と「病葉」を可視化(画像生成)できるので、生成された画像を目視比較することで、分類の判断の根拠を確認できます。例えば、図4で入力された病葉の診断には、黄変や表面の凹凸(凹凸があると影ができる)を使用して判定したことがわかります(図5)。これがこれまでの深層学習モデルにはない新しい点です。

分類精度

オープンアクセスの画像データセット(PlantVillage Dataset^{*4})を用いて学習したモデルで、バレイショ健全葉と疫病葉の分類をしました。オープンアクセスの画像データセットの健全葉146枚、疫病葉457枚のうち、健全葉110枚、疫病葉417枚を学習に使い、学習済みモデルを作成しました。残りの健全葉36枚、疫病葉40枚を用いて学習済みモデルの精度検証をした結果、100%の正解率を得ました。また、ほ場で撮影した健全葉340枚、モザイク症状の葉460枚のうち、健全葉290枚、モザイク症状葉410枚を学習に使い、学習済みモデルを作成しました。残りの健全葉50枚、モザイク症状の葉50枚を

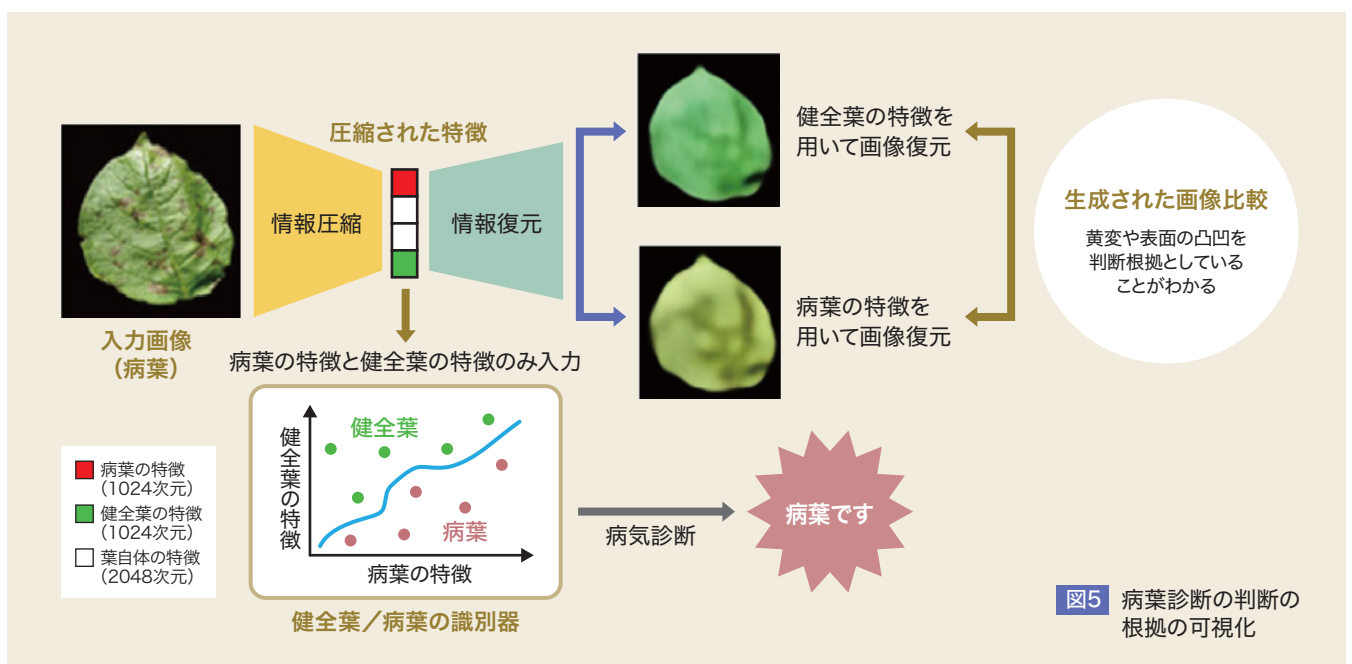


図5 病葉診断の判断の根拠の可視化

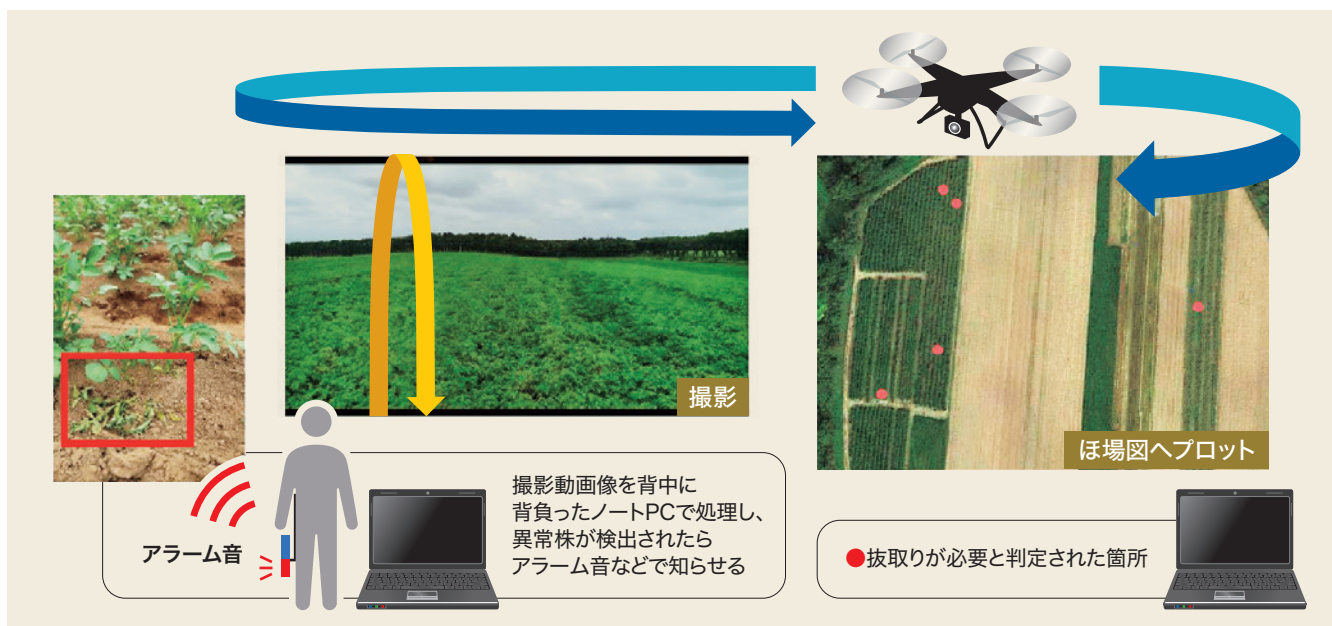


図6 ウェアラブルカメラやドローンを用いた異常株検知システム

用いて学習済みモデルの精度検証をした結果、100%の正解率でした。

PlantVillage Datasetは葉一枚ごとの画像で、背景が除去されています。一方、ほ場で撮影した画像には、図3に示したようにピントが合っていないもの、葉の一部のみに光が当たっているもの、影がかかっているもの、そして画像中に他の葉や土壌が写りこんでいるものもあり、PlantVillage Datasetよりも分類が難しいケースですが、同等の正解率になることを確認できました。

おわりに

将来的には、本手法を応用することで、ウェアラブルカメラやドローンを用いた異常株自動検知システムを実現します(図6)。例として、ウェアラブルカメラを作業者が装着してほ場内を見回り、異常株を自動検出することで目視による見落としを防ぐ支援システムを想定しています。もう一つの例として、カメラを搭載したドローンを用いて上空からほ場全体の撮影を行い、異常株を自動検出し、それらの位置を地図上に表示することで、効率的に異常株の抜き取り作業が可能な支援システムを想定しています。

(農業情報研究センター 農業AI研究推進室)

付記：本研究では官民 研究開発投資拡大プログラム(PRISM)予算を活用しました。

用語解説

- ※1 **深層学習** ヒトのニューロンを模して作られた多層のネットワークを用いた学習モデル。
- ※2 **変分オートエンコーダ** 教師画像の画像特徴の平均と各教師画像との違いを利用した画像生成モデル。
- ※3 **セマンティックセグメンテーション** デジタル画像中の各画素が何であるか分類。
- ※4 **PlantVillage Dataset** ペンシルバニア州立大学のプロジェクトPlant-Villageが提供する画像のデータセット。本資料ではこのデータセットの画像を使用した。現在は公開が停止されている。

参考文献

- 1) Habaragamuwa, H. et al. (2019) Plant Disease Identification using Explainable Features with Deep Convolutional Neural Network. 2019 International Joint Conference on JSAM and SASJ, and CIGR VI Technical Symposium joining FWFNWG and FSWG Workshops, 2019/9/4.
- 2) Habaragamuwa, H. et al. (2020) Achieving explainability for deep learning-based image classification applications in agriculture: Methods and approaches. 農業食料工学会誌, vol.82(3), 14-23.
- 3) Habaragamuwa, H. et al. (2021) Achieving Explainability for Plant Disease Classification with Disentangled Variational Autoencoders. arXiv:2102.03082.
- 4) Habaragamuwa, H.・大石優(2020) -AIを活用した農作物の病害虫診断等で活用- 画像診断根拠を可視化できるAI. 機械化農業, vol.3234, 214-223.
- 5) Habaragamuwa, H. et al. (2020) 画像の特徴を可視化できる新しいAIを開発 -農作物の病害虫診断等で活用-. 農研機構, プレスリリース. http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/rcait/133522.html (参照 2021-2-1)



第20回となる今年のSATテクノロジー・ショーケースは、2月にオンラインでの開催となりました。いつもとは勝手が違い、画面上のオンライン訪問者（アバター）に話しかけ、わかりやすく説明するのに苦戦する姿も見うけられました。

ポスター発表は80件余り、発表者は高校生から研究機関の研究者まで、テーマも物質・材料から資源・エネルギー、環境、地球・宇宙、農林水産、医療・福祉とまさに多様。本稿では、農研機構のポスター発表より2題をピックアップしてご紹介します。

三球温度計：コンパクトな新原理のセンサ

一日よけを使わずに正確な気温を測定

代表発表者：丸山 篤志

MARUYAMA Atsushi

(農研機構 農業環境変動研究センター)

コンパクトなセンサで気温データが身近に

気温は地球上の最も基本的な物理量の一つですが、野外で正確に気温を測定するためには、日射など放射の影響を避けるために百葉箱や通風筒が必要となります。そこで、放射の影響を計算で論理的に除去することで正確に気温を求めることができる多球温度計の原理を考案しました。

球体と大気の熱交換および球表面の熱収支の理論をもとに、球形のセンサで測定された温度と実際の気温の差が、球の直径の累乗に比例する性質を導きました。この性質を使うと、2つ以上の異なる直径の球形センサの温度から、回帰直線の切片を求める簡単な計算によって気温を求めることができます。

野外実験で最適な球の数と大きさの組み合わせを調べ、3つの小さな球形センサ（直径0.25mm、1mm、4mm）から構成される三球温度計を開発しました。センサには常温範囲で精度が高い熱電対を利用しました。さらに、クランク形状の保護管を利用して3つのセンサをグリップで束ねることにより、センサ部を折り畳みできる可搬性に優れた構造が実現しました（図1）。

野外実験から得られた三球温度計の精度は、平均で0.2°C以内（器差を含まない値）で、-3~34°Cまでの広い温度範囲で基準温度計の値とよく一致することが確認されました。

小型で電源が不要なため、様々な場所で気温の測定が容易になり、農業場面では作物の栽培管理や施設管理などでの活用が期待されます。

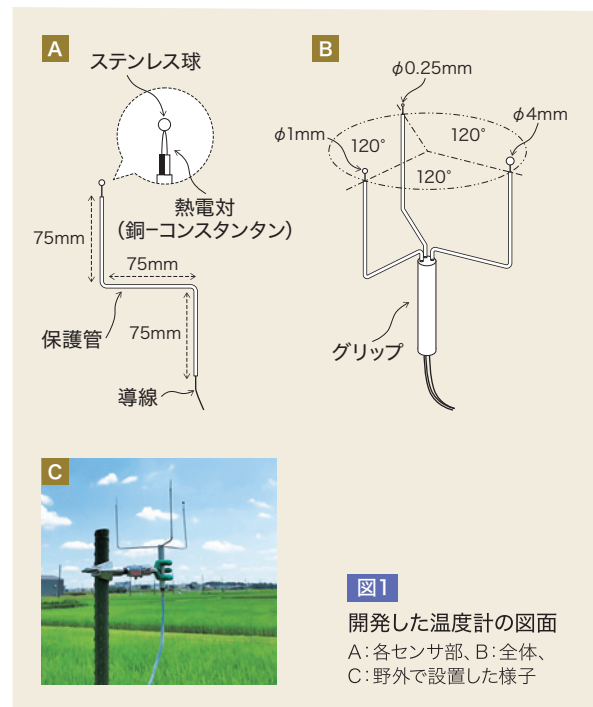


図1

開発した温度計の図面

A: 各センサ部、B: 全体、

C: 野外で設置した様子

■関連情報

特許第6112518号

Maruyama, A. et al. (2020) Agric Forest Meteor, 292.

■キーワード

- ① データ活用型農業
- ② ICT
- ③ 微気象センサ
- ④ 熱収支
- ⑤ 三球温度計

SATとは

つくばサイエンス・アカデミー (Science Academy of Tsukuba; SAT) は、異分野の研究者による交流の促進や、科学・技術に対する社会の関心を増進させるために、様々な事業を実施しています。「SATテクノロジー・ショーケース」はその一つです。つくばを中心に様々な分野の研究者が例年なら一堂に会し、ポスター発表や特別講演、シンポジウムなどを通して交流を深め、「知の触発」による研究内容の向上や研究成果の実用化、ビジネス化の促進を図るというものです。

▼ 詳細はこちらから



ポスター発表一覧

<https://www.science-academy.jp/showcase/20/list.html>

音響を用いた農業害虫防除技術の開発

— 省力的で環境にも優しい防除を目指して —

代表発表者： 久保田 健嗣
KUBOTA Kenji
(農研機構 中央農業研究センター)

虫の特性を防除に活用

トマトなど果菜類の施設栽培では、トマト黄化葉巻ウイルス (TYLCV) など、植物ウイルスによる病害の発生が大きな問題となります。これらのウイルスは、防除が困難な微小害虫であるタバココナジラミやオンシツコナジラミによって媒介されることから、コナジラミ類の防除が不可欠であり、現在は殺虫剤による防除が主流となっています。

コナジラミ類は、同じくカメムシ目のセミのように、腹部から振動信号を発信し、雌雄間で交信しています。私たちの研究グループはコナジラミ類に対する全く新たな発想に基づく防除法として、人工的な音響を用いて、コナジラミ類の交尾に必要な雌雄間の信号を阻止することを着想しました。温室やパイプハウスなど園芸施設内に、疑似的な交信音を流すだけで、コナジラミ類の交尾を阻害でき、省力的、かつ環境に優しい防除技術となることが期待されます。

1 まず、きわめて微弱なタバココナジラミの発生音を収録できる測定装置を開発し、これを用いて、タバココナジラミのバイオタイプ (形態で判別できないが生物的特徴が異なるグループ) ごとに、音響学的特性を明らかにしました。

2 次に、タバココナジラミの腹部振動の伝達に関する実験を行い、葉面に寒天を密着させて振動を伝わらなくすると、タバココナジラミの交尾成功率は有意に低下することを明らかにしました。

3 コナジラミの交尾行動を阻害できる音を特定し、トマトなどの栽培施設において効率的に照射できる音響照射装置を開発しました (図2)。農薬散布のみに頼らない、画期的な防除技術となる可能性を秘めています。



図2 ほ場利用型の忌避効果音防除装置の開発
栽培施設環境に配慮して、交尾阻害音を効果的に照射できる装置を開発しました。(久保田ら、2019)

■ 関連情報

特開2018-093830 微小生物侵入抑制装置
久保田健嗣ら(2019) 日本応用動物昆虫学会誌, 63, 97-107.

■ キーワード

① タバココナジラミ ③ 音響防除
② 施設園芸

■ 共同研究機関

筑波大、埼玉県農業技術研究センター、ホルトプラン合同会社

種子の寿命はどのくらい？

—NAROジーンバンクの発芽試験データから—

YAMASAKI Fukuhiro 山崎 福容

種子はどれくらいの間、発芽能力を保つことができるのでしょうか。これは種子の適切な管理を行っていく上でとても大きな問題です。農研機構では、農業上重要な遺伝資源^{*}を収集・保存・配布するジーンバンク事業を1985年から行っています。その保存形態として最も多いのが植物の種子であり、イネやコムギ、ダイズなど約19.5万系統が種子庫の中で保存されています。

種子は、低温・低湿度の環境下に置くことで寿命を延ばすことができることが知られており、配布用の種子の保存庫(図1)は-1℃、相対湿度30%に保たれています。しかし当然ながらそのような環境下でも永久的な保存が可能なのではなく、発芽能力は徐々に低下していきます。そのため、5年に一度の間隔で発芽試験(図2)を行い、発芽率の低下が認められたものについて新しい種子を採種しなおすことで、高い発芽率を保つよう努めてきました。

遺伝資源をより確実に保存するためには発芽試験の間隔を短く設定した方が安全といえますが、過剰な頻度でのモニタリングは種子の浪費や維持コストの増大につながります。そこで、発芽試験の間隔を最適化することを目的として、過去30年間に蓄積してきたのべ40万回におよぶ発芽試験のデータを統計的に解析し、植物50種の種子寿命を推定しました。その結果、-1℃、相対湿度30%の条件で、ダイズの種子はおおよそ15年、コムギは20年、トマトは30年、ソバは70年、キュウリは125年の間、初期発芽率の85%を維持できると推定されました(表1)。また、イネやオオムギ、ゴマなどの作物では、それらの原産地などで異なる寿命のパターンを示すケースも確認できました(図3)。

これまでに発表された種子の寿命に関する研究の多くは、短期間の観察で結果を得るためにあえて高温多湿な環境に種子を置くなど、人為的な加齢処理を用いて寿命を

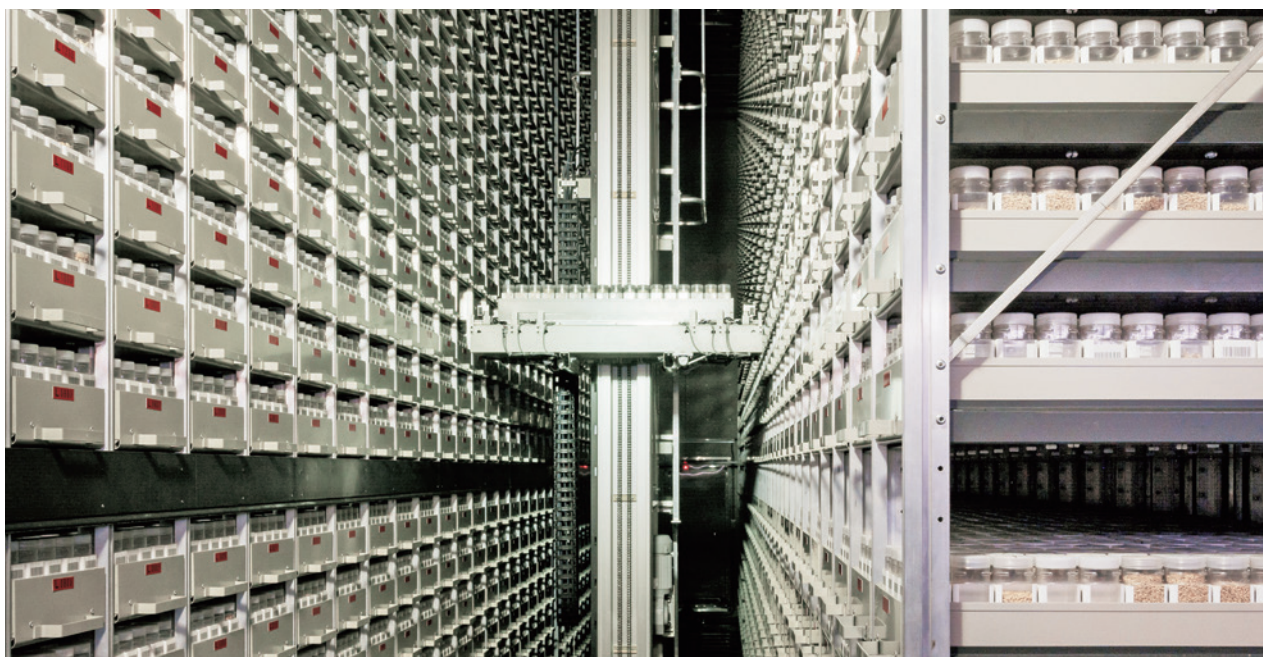


図1 内部が-1℃、湿度30%に保たれた配布用種子貯蔵庫(茨城県つくば市)

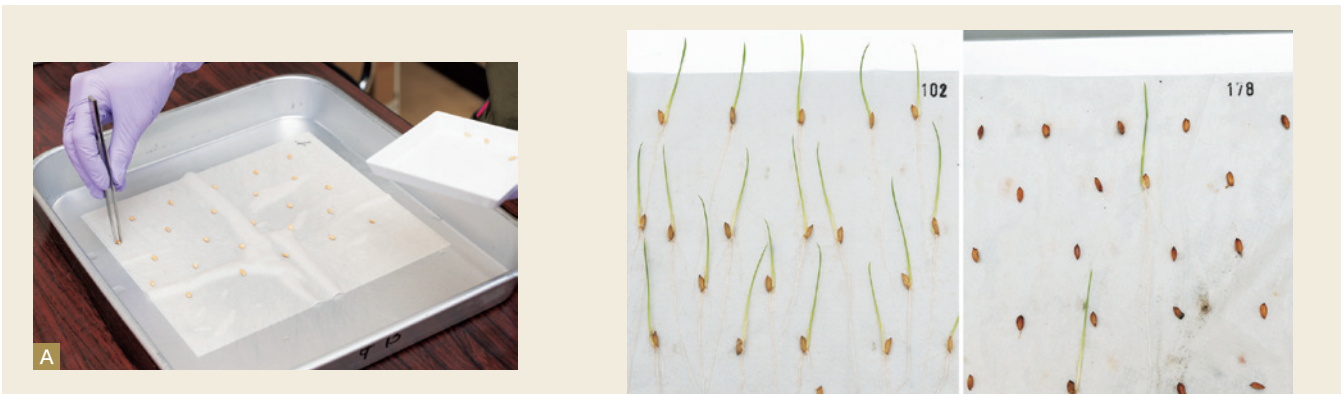


図2 イネの発芽試験の様子(A)とその結果(B-1, 2)。B-2の写真のように、発芽率が低下した場合には採種しなおします。

推定したものでした。これに対して、本研究が示した種子寿命は実際の保存環境から得られたのべ40万回の発芽試験データを元に推定したものであり、より現実に即した値であるといえます。これは、長年にわたって数多くの遺伝資源の保存を行ってきた農研機構ならではの成果です。今後は本研究から得られたデータを実際の発芽試験のスケジュールに組み込むための検証や、種子の寿命と相関の強い形質の特定、種子の寿命に影響を与える遺伝子の探索などに取り組んでいく予定です。

(遺伝資源センター 保存技術・情報チーム)

用語解説

※**遺伝資源** 現実または潜在的な価値をもつ、植物・動物・微生物などに由来する素材です。農研機構では植物の種子や微生物、動物の生殖細胞などを保存し活用するためのジーンバンク事業を行っています。

参考文献

Yamasaki, F. et al. (2020) Thirty-year monitoring and statistical analysis of 50 species' germinability in genebank medium-term storage suggest specific characteristics in seed longevity. *Seed Science and Technology*, 48(2), 269-287.
<https://doi.org/10.15258/sst.2020.48.2.14>

表1 -1°C、湿度30%の環境下における主な植物の推定種子寿命¹⁾

植物種	検査ロット数 ²⁾	推定種子寿命(年)
イネ	28,679	17.2
コムギ	20,843	20.5
オオムギ(六条)	6,856	31.0
オオムギ(二条)	2,268	28.9
アワ	2,880	17.5
ゴマ	1,834	23.6
ソバ	739	68.1
ソルガム	4,485	25.5
トウモロコシ	3,953	21.2
アズキ	3,094	14.0
ダイズ	14,247	15.8
キュウリ	835	127.1
トマト	1,063	31.3
ナス	571	36.2
メロン	834	59.3
ギニアグラス	516	8.4

1) 初期発芽率の85%を維持できる期間を寿命と定義しています。
 2) ロットは保存の最小単位であり、一つの系統について複数のロットが存在する場合があります。より詳細なデータが
https://www.gene.affrc.go.jp/?db_pl_germ から参照可能です。

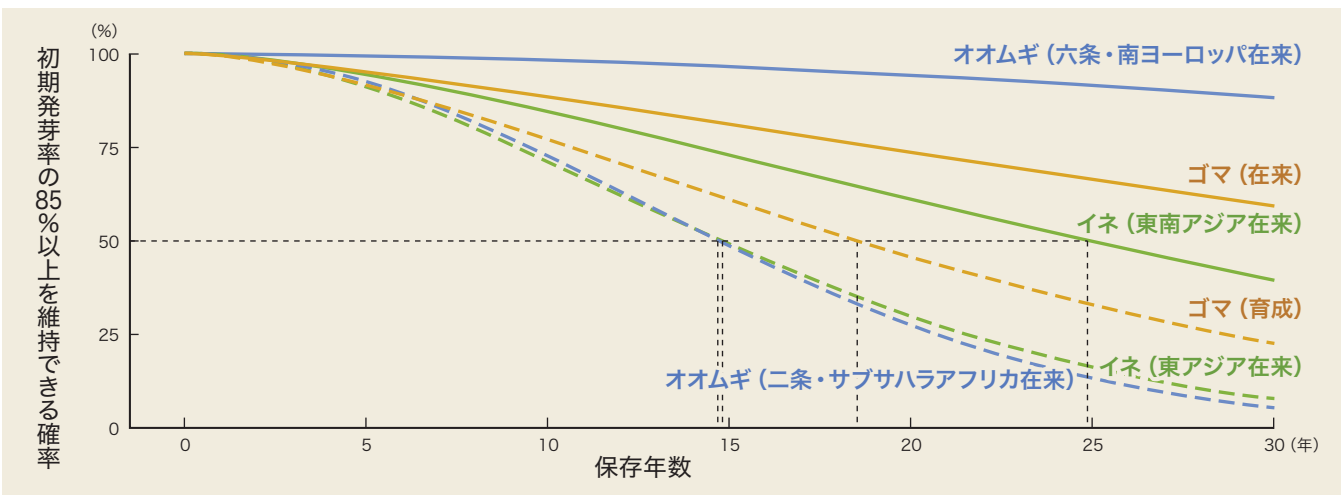


図3 原産地や育成・在来の別によって植物種内で種子寿命が異なる例

再思三省

>> 何度も考え、何度も自らを省みる

農研機構技報は、創刊からこれまでに計8号を発行してきました。多くの皆様のもとに届き、何かのお役に立てておりますでしょうか。



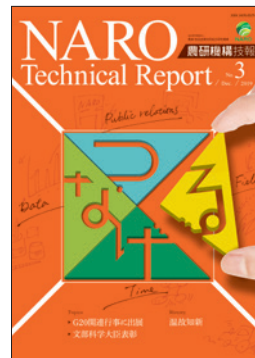
創刊号

特集
品種開発



No. 2

特集
スマート農業



No. 5

特集
ドローン



No. 6

特集
農村の活性化・
高付加価値化



Editor's Note

編集後記

今号では、米粉パン、バイオ電池、シルク素材、自動運転田植機、流水熱交換技術、物理的防除技術、病虫害診断AIなど、農研機構で開発し、農業・食品分野において今後の活用が期待される技術を紹介しました。

農研機構では、①農産物・食品の国内安定供給と自給率向上に貢献する、②農業・食品産業のグローバル競争力を強化し、わが国の経済成長に貢献する、③地球温暖化や自然災害への対応力を強化し、農業の生産性向上と地球環境保護を両立することを目標として、農業・食品分野で科学技術イノベーションの創出に取り組んでいます。

ところで、『オープンイノベーション白書第三版 (NEDO 2020)』によれば、イノベーション創出には5つの視点が重要であるとし、「新たな価値・アイデアを創出する」、「価値をマネタイズさせるビジネスにする」、「人々の生活様式・産業構造を変革する」、「変革の対象がグローバルである」、「イノベーションのスパイラルアップの礎となる」が挙げられています。

農研機構は、今後も農業・食品分野の構造を変革する新たな価値・アイデアを形にするための研究に取り組んでいきます。今号がその取り組みの一端を知っていただく機会となれば幸いです。

(編集委員長)

NARO Technical Report

各号の二次元バーコード
からPDF版・電子ブック版
でご覧いただけます



PDF版



電子ブック版

No. 3

つなげる



No. 4

特集
気候変動



No. 7

特集
品種開発Ⅱ



No. 8

アイデアを
かたちに



ご意見・ご感想をお聞かせください

『農研機構技報』 NARO Technical Report 読者アンケートのお願い

今後の編集の参考とさせていただくため、アンケートへのご協力をお願い致します。ご多忙中恐れ入りますが、以下のURLまたは各号のサイトからアンケートにお答えいただき、率直なご意見・ご要望をお聞かせください。



アンケートは
こちらから

URL: <https://prd.form.naro.go.jp/form/pub/naro01/ntr>

アンケート質問例

本誌を読んで、農研機構の開発技術や取り組みへの理解が深まりましたか？
あてはまるものを選択してください。

- 深まった
- やや深まった
- どちらともいえない
- やや深まらなかった
- 深まらなかった

農研機構技報

NARO Technical Report No.8

2021年3月22日発行

発行者/久間和生

発行所/農研機構 広報部広報戦略室(編集委員会事務局)

〒305-8517 茨城県つくば市観音台3-1-1

製作協力・印刷/株式会社アイワット

非売品

本誌研究内容に関するお問合せは

✉ www@naro.affrc.go.jp TEL 029-838-8988 (代表)

農研機構HP



*本誌掲載の記事・写真・イラストの無断転載・複写を禁じます。

