

(公財)農学会・日本農学アカデミー・日本学術会議育種学分科会共同主催
公開シンポジウム

講演要旨

気候変動下の食料生産の 確保に向けた研究最前線

2025年3月16日(日) 13時00分～17時30分

後援：東京大学大学院農学生命科学研究科
ワールドウォッチジャパン

講演要旨 目次

はじめに	3
(公財)農学会会長 丹下 健	
気候変動下の食料生産:日本の稲作への影響と適応を事例として	4
農研機構 農業環境研究部門 長谷川 利拡	
ゼロエミッション植物工場～植物工場の社会的・文化的な普及に向けて～	6
NPO 植物工場研究会 林 絵理	
作物による硝化抑制で地球環境にやさしい効率のよい食料生産を	8
国際農林水産業研究センター 吉橋 忠	
気候変動に応えるデータ駆動型育種:品種改良の新たな可能性	10
東京大学大学院農学生命科学研究科 岩田 洋佳	
遺伝資源開発による高温・乾燥耐性コムギ育種への挑戦	12
鳥取大学乾燥地研究センター 辻本 壽	
講演者プロフィール	14

はじめに

かつて体験したことのない雨量や気温による災害は、日本のみならず世界で頻発しています。気候変動の原因は、大気中の温室効果ガス濃度の上昇による地球温暖化です。パリ協定では、産業革命前に比べて世界の年平均気温の上昇を1.5℃以内に抑えることを目指すとしていますが、近年では世界の年平均気温の最高値の更新が続き、2024年の世界の年平均気温は、産業革命前に比べて1.55℃上昇したことが報告されました。このままの経済活動が継続すると今世紀末には4℃上昇すると予測されています。

降水量や気温などの物理的環境の変化は、作物の光合成生産に影響するだけでなく、害虫や病原菌の北上など、作物の生物的環境の変化を介して収量や品質に影響をもたらします。「気候変動」が農業生産にも大きな影響を及ぼしている現状が、マスコミでも広く報じられています。キャベツや白菜などの野菜や温州ミカンなどの価格高騰は、現在も続いており、近年、米の一等比率が低下傾向にあることも報道されています。

食料は、人類の生存に不可欠な資源です。食料生産は、温室効果ガスの排出源となっており、地球温暖化を緩和するための対策の推進が求められるとともに、植物や動物という生き物を扱う産業であることから、高温や乾燥に強い作物の育種など、気候変動への適応策も食料確保においては重要となります。今後さらに気温上昇が進むと、屋外での作物栽培が制限される状況も想定されます。そのような状況では、植物工場などの人工環境での作物栽培をカーボンニュートラルで行う技術も必要となります。

共同主催団体である日本農学アカデミーとは、一昨年4月に「食の未来 ―タンパク質食品―」、昨年3月に「変わりゆく海の環境と海の恵み」と、気候変動と食に関する公開シンポジウムを開催しました。今回は、日本学術会議農学委員会育種学分科会に加わっていただき、気候変動下での食料確保に向けた作物栽培に関する農学研究の取組を紹介するシンポジウムを企画いたしました。食は、生存に必要な栄養素を摂取するだけではなく、楽しみや文化という価値があります。我々の食を維持していくために、今、どのような取組がなされているのかを共有し、未来の食について皆様と考える機会としたいと思います。ご参加いただいた皆様にとって有意義な時間となりますことを願っております。

最後になりますが、ご多忙のなか、ご講演をお引受け頂きました登壇者の皆様に深く感謝いたします。

公益財団法人 農学会
会長 丹下 健

気候変動下の食料生産：日本の稲作への影響と適応を事例として

長谷川利拓

(国研)農業・食品産業技術総合研究機構

1. はじめに

温室効果ガスの排出に伴う地球温暖化は、気温上昇や降水パターンの変化をもたらし、農業生産に深刻な影響を与えている。これにより、作物の収量や品質の低下、栽培適地の変化、極端気象による農業災害の増加など、さまざまな課題が生じている。特に、干ばつや豪雨、高温などの極端現象が頻発することで、食料生産の変動が激しくなり、食料価格の高騰や供給の不安定化を引き起こしている。これらの影響は、地域ごとに異なる形で現れるものの、食料安全保障の観点からも大きな懸念事項となっている(IPCC 2022)。

2011～2020年の世界の平均気温は、産業革命前(1850～1900年)と比較して1.09℃上昇しており、そのほぼすべてが人為起源によるものと推定されている(IPCC, 2021)。この温暖化傾向は1980年代以降特に顕著になり、農業生産にも大きな影響を及ぼしている。例えば、人為起源の気候変動は、1961年から2015年にかけて世界各国の農業生産に関する全要素生産性の増加率を約21%鈍化させたと報告されている(Ortiz-Bobea et al., 2021)。さらに、気候災害による食料生産の損失は頻度が増加し、その影響は特にアフリカ、中南米、南アジアなどで大きく、今後も気候変動の進行とともに拡大すると懸念されている。

日本においても、気候変動の影響は顕在化しつつある。とりわけ、日本の農業の根幹をなす水稲作においては、高温による登熟障害、品質の低下、生育期間の短縮などが問題視されている。近年では、猛暑による白未熟粒の発生が増加し、品質面で甚大な被害が発生している。これらの気候変動によるリスクは、今後さらに深刻化する可能性がある。本稿では、温暖化が日本の水稲作に及ぼしている影響について整理し、将来の気候変動の進行に伴うリスクを評価するとともに、適応策の効果について概観する。

2. 日本の水稲作への影響

温暖化の進行により、水稲の登熟期における高温曝露が増加し、米粒が白く濁る「白未熟粒」の発生が顕著になっている。白未熟粒は、登熟期(稲穂が出てから約20日間)におけるデンプンの異常蓄積が原因とされており、特に日平均気温が26℃を超えると、その発生率が増加することが知られている。白未熟粒の発生リスクを評価するため、登熟期の高温曝露を示す指標「MET26」(登熟期20日間における、日平均気温26℃超過分の積算値を20で割ったもの)が用いた。解析の結果、2000年以降、全国平均のMET26指数は著しく上昇し、特に関東、北陸、近畿では10年あたり0.34～0.51℃の増加が確認された。さらに、MET26は一等米比率と高い負の相関を示し、2011～2023年のデータでは、MET26が1℃上昇すると、一等米比率が15ポイント低下することが明らかとなった(Hasegawa et al., 2025)。

開花期の高温は、水稲の受粉や受精に悪影響を及ぼし、不稔粒を増加させることが知られている。特に、穂温が33℃以上に達すると不稔が発生しやすくなり、収量低下の要因となる。このような「高温不稔」は、近年の温暖化に伴いリスクが確実に高まっていると考えられているが、具体的な影響の定量化は十分に行われてこなかった。そこで、全国約15万地点(約1×1kmメッシュ)の気象データを解析し、群落微気象モデルを用いて穂温を推定し、高温指標を計算することで不稔率の変化を評価した(Toda et al., 2024)。その結果、出穂前後に穂温が33℃を超える日の出現頻度は、2000年以前にはほとんどなかったが、2000年以降、各地で指数関数的に増加し、2023年の異常高温年には関東や北陸の一部地域で40%を超える県も確認された。このような高温不稔の増加は、今後のさらなる温暖化の進行に伴い、水稲の収量低下リスクを一層深刻化させる可能性が高い。

3. 日本の水稲作の将来予測

現在進行している影響が、今後さらに拡大することが懸念されている。コメ収量の将来予測については、1990年代後半から全国規模で影響評価が進められ、気候シナリオの更新や作物影響評価モデルの改良に伴い、新たな結果が報告されてきた。最新の予測では、過去に実施された屋外栽培実験「開放系大気CO2増加(FACE)実験」の知見を活用し、高温と高CO2濃度が水稲に及ぼす複合的な影響を考慮して、生育・収量予測モデルを改良した(Ishigooka et al., 2021)。この

改良モデルを用いて日本全体の水稻収量を予測した結果、従来の予測と比較して収量が低く算定され、とくにRCP8.5シナリオ(高排出シナリオ)では年代が進むにつれてその差が拡大し、今世紀末には約20%の減収が見込まれることが明らかとなった。また、白未熟粒率の将来予測では、高CO2の影響を考慮した新たな推定モデルを用いた結果、従来の予測よりも高い値が算定され、RCP8.5シナリオでは今世紀半ばで約20%、今世紀末には約40%に達すると予測された。さらに、地域別の影響分布を分析したところ、これまで増収が予測されていた北日本や高緯度地域では、その範囲が縮小する傾向が示された。一方で、白未熟粒の発生リスクは、東日本以西にとどまらず、北日本にも広がる可能性があることが明らかとなった。

4. 適応策とその効果（品種の高温登熟性（高温耐性品種）を事例として）

2000年頃から進められてきた高温耐性品種の育成は、高温でも白未熟粒の発生を抑えることができ、温暖化への有効な適応技術として期待されている。水稻品種の高温耐性は、白未熟粒の発生程度によって5つのランクに分類されている。しかし、これまで高温耐性ランクの違いが白未熟粒の発生にどの程度影響を与えるかを数値化する方法は確立されていなかった。そこで、全国から収集した栽培試験結果を基に、白未熟粒の発生割合を気象条件と品種の高温耐性ランクに基づいて推定するモデルを開発した(Wakatsuki et al., 2024)。得られたモデルにより、穂が出てから20日間の気温が28℃程度(MET26が2℃)の場合、高温耐性ランクが「弱」の品種では白未熟粒率が45%、ランクが「中」の品種では24%、ランクが「強」の品種では11%と推定された。また、気温が30℃程度(MET26が4℃)に上昇すると、「やや強」や「強」ランクの品種でも白未熟粒率が増加するが、高温耐性品種の効果は顕著に現れる。たとえば、MET26が4℃の場合、高温耐性ランクを「中」から「やや強」に1ランク上げるだけで、白未熟粒率は10ポイント以上抑えられると推定された。

気候変動が農林水産業に及ぼす影響と適応技術の効果が、温暖化レベルに応じてどのように変化するかを定量的かつ統一的に示すため、改良した収量・品質予測モデル(Ishigooka et al., 2021)および品種の影響を考慮した白未熟粒予測モデル(Wakatsuki et al., 2024)を組み合わせ、産業革命前からの温暖化レベルが外観品質の米粒(白未熟率30%以下)の収量に及ぼす影響を解析した(石郷岡ら、2025)。その結果、現在の品種を引き続き栽培した場合、産業革命前からの温暖化レベルが1℃を超えるだけで、日本全体で白未熟率の低い高品質米の生産量が減少することがわかった。一方、品種の高温耐性を2ランク向上させることで、温暖化が2℃程度進行しても高品質米の生産量を維持できることが示された。しかし、それ以上の温暖化が進行すると、高品質米の生産量が低下することが予測された。なお、高温耐性品種の効果を十分に発揮するためには、作期の変更、適切な肥料、土壌、水管理などを組み合わせた対策が必要である。

5. おわりに

気候変動は、日本の稲作に深刻な影響を及ぼしており、今後さらにその影響が拡大すると予測される。高温耐性品種の開発や栽培技術の改良は、温暖化に適応するための重要な対策であるが、それだけでは限界がある。持続可能な食料生産体系を確立するためには、温室効果ガスの排出削減と適応策を統合的に実施し、農業政策と環境政策の連携を強化することが求められる。

引用文献

1. Hasegawa et al, 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2436-2_4
2. IPCC, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
3. IPCC, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
4. Ishigooka et al., 2021. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-20-00038>
5. 石郷岡ら、2025. 日本農業気象学会2025年熊本大会
6. Ortiz-Bobea et al, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>
7. Toda et al, 2024. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-24-00002>
8. Wakatsuki et al, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109303>

ゼロエミッション植物工場～植物工場の社会的・文化的な普及に向けて～

林 絵理

NPO 法人植物工場研究会

1. はじめに

気候変動、様々な天然資源の枯渇化、農業人口の減少や高齢化など、地球や社会における様々な問題が各地で深刻化するなかで、持続可能な新たな農業の一つとして、人工光型植物工場（以下、植物工場）への関心が世界的に高まっている。植物工場の特徴や動向、そして主に現状の技術的な課題を踏まえ、持続可能な未来に向けた、植物工場技術の活用や普及について概観する。



写真 植物工場の栽培室

出所 NPO 法人植物工場研究会

2. 植物工場の特徴

植物工場は、食料・農業、環境・生態系、エネルギー・資源だけでなく、社会・経済・人々の健康や生活の質におけるグローバルおよびローカルな課題の同時並行的な解決に貢献し得る。断熱性・気密性が高い栽培施設内で環境を制御する植物工場は、地域・場所を問わず天候による影響を受けずに年間を通して安定的、計画的、かつ効率的な植物生産を可能にする。太陽光の代わりに LED 照明など人工光源を使用し、植物工場は主として照明、空調（温湿度、気流）、CO₂ 施用、養液栽培、環境管理などで構成され、目的に応じて環境条件を設定・制御している。植物工場では、高品質で新鮮、高機能で無農薬、かつ衛生的な植物を周年大量に生産し、高効率な資源利用や高い生産性を実現し得る。

断熱性・密閉性が高い植物工場では、センサーを活用した高精度な時系列計測・データ収集、そして信頼性の高い時系列データセットを用いた時系列分析や生産計画などに係る予測、さらに時間当たり・単位資源投入量当たりの生産性や金額換算生産性の推移分析などが栽培しながら誰でも容易に実施できるという特長がある。

3. 植物工場の現状と技術課題

日本国内では、1960 年代から植物環境調節施設ファイトトロンを用いた植物の環境応答などに関する研究が開始され、特に植物工場の商業化を念頭に置いた研究開発が継続的に実施されてきた。近年は 1 日当たり 1～5 トン規模のレタス類を生産・出荷する植物工場も増え、大規模化に伴う自動化技術や商業植物工場における生産性の向上など、植物工場に

おける技術的ならびに経済的な進展がみられる。

しかしながら、真に持続可能な植物工場の社会的な普及に向け、現状の植物工場にはエネルギーなどの資源自律型・循環型の工場運営の実現など研究開発課題が大いに残っており、さらなる技術的・社会経済的な発展が求められている。断熱性・気密性が高い空間で植物を栽培する植物工場は、再現性、予測可能性、可観測性、追跡性さらに可制御性が高いという特長を有するが、それを活かさきれていないという大きな課題がある。さらに、植物特性（表現型）と栽培環境や栽培管理との相互作用の解明も課題となっている。拡張性のある栽培システムの構築に加え、より精緻な環境測定と方法の標準化、植物工場の栽培環境下でも活用可能な非破壊・非接触の時系列表現型計測（植物フェノタイピング）技術の実装化が必要とされている。

4. ゼロエミッション植物工場の実現に向けて

エネルギーをはじめとした資源自律・循環型・進化型の植物工場の実現が期待されている。より良い社会における革新的、創造的、進化的、持続可能な植物工場を目指し、植物工場固有の技術開発理念と植物環境工学に基づき複数の要素技術を適切に統合し、市民科学や都市計画なども考慮した学際的研究と植物工場関連の共同活動を行うことが不可欠である。今後、人工知能技術を多面的に活用した資源自律型・循環型・進化型の植物工場が実装化され、植物工場で栽培される植物や植物工場を活用した選抜・育種など応用技術と活用方法が多様化し、植物工場がウェルビーイングな社会における社会インフラの一つとしての役割を果たすと考えられる。この植物工場関連技術の利用者は、商業生産者や研究者に限らず、市民が市民科学やコミュニケーションツールの一環として植物工場を楽しみ、植物工場におけるサイバーフィジカルシステムを活用した宇宙・地球・複数の地域コミュニティの形成が広がり、人々の生活の中で活用され、持続可能な生活の一部となることが期待される。

参考文献

- 1) 林 絵理 (2024) 植物工場の今と未来—持続可能な植物工場の社会的・文化的な普及に向けて. 日本農学アカデミー会報. 第 42 号.
- 2) Kozai, T. and Hayashi, E. (eds.) (2023) *Advances in Plant Factories: New technologies in indoor vertical farming*, Burleigh Dodds Science Publishing Limited, 496 pages.
- 3) 古在豊樹 (2009) 農を基盤とした文化・学術. 農業および園芸. 84(2). 225-232.

作物による土壌の硝化抑制で地球環境にやさしい効率のよい食料生産を

吉橋 忠

(国研) 国際農林水産業研究センター

1. はじめに

我々の豊かな食生活を支えているのは、窒素肥料を農地に投入することで成り立っている近代農業である。農地に投入される窒素肥料は1961年から2011年までの50年間に10倍まで増加しているが、この間の食料生産は3倍程度にとどまる。大量の窒素農地に投入され続けたことで、投入された窒素が生態系で処理しきれなくなり、半分以上が損失していることも指摘されている。土壌では、硝化菌がアンモニア態窒素を酸化しエネルギーを得ており、アンモニア態窒素として投入された窒素肥料が、土壌に吸着されにくい硝酸態窒素へと変換される。土壌から流失した硝酸態窒素は地下水汚染や、水圏の富栄養化の要因となっている。また、これに伴い、強力な温室効果ガスである一酸化二窒素 (N_2O) が発生する。これらから、人類の活動により生み出される環境中に過剰に放出される硝酸態窒素、一酸化二窒素などの反応性窒素により、地球の窒素循環は既に地球生態系の処理できる限界を超え、高リスクにあるとされている。しかし、世界の食料需要は未だ増大しており、今後数十年の間にこれまでの数十年に比べ、急速な食料増産が必要とされている。

2. 生物的硝化抑制(Biological Nitrification Inhibition; BNI)とは

1986年の国際熱帯農業研究センター(CIAT)でのイネ科熱帯牧草での観察をもとに、国際農研は1995年にCIATとの国際共同研究を開始し、この熱帯牧草の土壌では硝酸態窒素が極端に少ないだけでなく、土壌中の硝化菌と硝化古細菌の数が少ないことが解明された。我々は、牧草に硝化を抑制する機能があると考察し、さらに研究を進め、根から放出される物質、ブラキアラクトンが土壌硝化菌を選択的に抑制することで、土壌硝化を抑制することを明らかにした。我々は、この現象を「生物的硝化抑制(Biological Nitrification Inhibition; BNI)」と名付け、BNI活用で、農業生態系の窒素循環改善と、農業由来の環境負荷を低減することを目指した。熱帯牧草でのBNIの発見とその研究に引き続き、BNIを活用し、硝化を抑制することで、作物により多くの施肥窒素を吸収させ、損出を減らしながら、生産性を向上させることは、耕種的に可能であり、我々はこれをBNI強化作物と定義して、耕種的緩和(Genetic mitigation)として研究を進めている。この中、イネ科の畑地穀物であるコムギ、ソルガム、トウモロコシ、そして同じくイネ科の雑穀をターゲットとして、これを活用したBNI強化作物の確立に向けた研究を進めてきている。この中、国際農研はBNI国際コンソーシアム主宰し、その会議を隔年で開催しており、昨年12月につくばで100名を超える参加者で議論を実施した。

3. 世界初の BNI 強化作物のプロトタイプ、BNI 強化コムギの開発

コムギは窒素施肥が重要とされる作物である。我々は、コムギにおいて BNI を活用することを意図し、国際トウモロコシ・コムギ改良センター(CIMMYT)の過去の高収量品種及び遺伝資源の BNI 能を検討した。しかし、高い BNI 能をもつものではなく、コムギと掛け合わせ可能な野生コムギであるオオハマニンニク (*Leymus racemosus*) に強い BNI 能を見出した。コムギは 6 倍体であり、属間交配によって進化したことが他の多くのイネ科穀物にない特徴でもある。我々はオオハマニンニクの BNI 能が N 染色体短腕 (Lr#N-SA) に由来することを突き止め、さらにこれをコムギ 3B 染色体短腕と置換した系統を作出した。属間交配は遺伝子組換えではないため、直ぐに圃場試験が可能なのが利点である。さらに、圃場での評価にむけ、南アジア向け高収量品種に BNI 能を持つ Lr#N-SA を戻し交配によって導入した。親系統の BNI 能は、根乾物 1g、1 日あたり 92.7 ± 12.1 ATU (アリルチオ尿素当量; 硝化抑制の度合の単位) であるのに対し、BNI 能を導入すると 181.7 ± 22.3 ATU と、2 倍程度まで強化された。茨城県つくば市の圃場でこれらの系統の試験を実施したところ、BNI 強化コムギは親系統に比べ、根圏土壌の硝化菌数のうち、硝化古細菌の抑制が見られ、土壌の硝化は約 30%減少し、根圏土壌からの N_2O 排出量は約 25%減少した。このことから、Lr#N-SA の導入による BNI 強化により、農地からの環境負荷が低減することが明らかになった。収量を低減せずに施肥量を低減することが出来、窒素施肥による農業からの環境負荷を低減することが期待できる。

4. 日本発の BNI 強化コムギ、世界へ

世界第 2 位のコムギ生産国、インドでは、緑の革命の成功体験と食料安全保障への懸念から、窒素肥料への高い補助を維持しているため、過剰な窒素施肥による環境負荷が問題になっている。これに対応するため、環境負荷を低減すると同時に、生産性をむしろ向上させることを目的として、SATREPS(JST-JICA)プロジェクト「生物的硝化抑制 (BNI) 技術を用いたヒンドゥスタン平原における窒素利用効率に優れた小麦栽培体系の確立」を実施しており、BNI 能をインドの優良品種に導入している。また、ネパールにおいてグリーンアジアプロジェクトを推進しており、この中で、BNI 強化コムギ品種への既存品種の置換えを念頭とした試験が進められている。また、日本では「国内向け BNI 強化コムギの開発の加速化」プロジェクトで BNI 強化コムギの導入を図っている。

5. 最後に

コムギでは、世界の約 2 億 2500 万 ha ものコムギ生産地域を見据え、生産性を向上させながら、持続性を確保することを目指し、研究を進めてゆくこととしており、他の作物もこれに続くよう、鋭意研究を進めているところである。BNI 技術が、環境負荷を低減しながら食料生産を効率化するための重要な一歩となるよう努力していきたい。

気候変動に応えるデータ駆動型育種：品種改良の新たな可能性

岩田洋佳

東京大学大学院農学生命科学研究科

気候変動とデータ駆動型育種

現在、地球規模の気候変動が作物生産に大きな影響を及ぼしており、気候変動に適応できる品種の開発がますます重要になっている。環境変動に適応する品種を効率的に開発するには、植物の環境応答データを収集・モデル化し、そのモデルを活用して選抜や交配を最適化する必要がある。これは、データ駆動型育種と呼ばれるアプローチの一つである。データ駆動型育種では、データの計測・蓄積、モデル化・シミュレーション、最適化された意思決定が、組織的かつ循環的に実施される。近年注目されているゲノミック選抜もその一例であり、ゲノムと表現型データを統合的に活用することで、迅速な育種が可能となる。

データ駆動型育種を実現するには、効率的なデータ計測技術の開発が不可欠である。我々は、ダイズの干ばつ耐性をモデル化するため、近接リモートセンシングと統計モデルや機械学習と組み合わせた高度な計測手法を開発し、得られたデータをもとに干ばつ耐性を予測する手法を構築した^{1,2,3}。また、植物の成長や環境応答パターンを予測するモデルを開発し^{4,5,6}、望ましい環境応答をもつ遺伝子型の選抜を可能にした。さらに、交配・選抜の意思決定や育種過程の設計を最適化することで、遺伝的改良の効率を高められることを示した^{7,8,9}。

本講演では、こうしたデータ駆動型育種の可能性について、複数の視点から議論する。

顧みられない未利用種とデータ駆動型育種

現在、気候変動の影響を軽減し、それに適応するための農業システムの再構築が求められており、長い歴史の中で自然と共存してきた伝統農業や、それを支えてきた在来種への注目が高まっている。こうした在来種の多くは、顧みられない未利用種（neglected and underutilized species: NUS）や孤児作物（orphan crops）と呼ばれ、極端な土壌や気候条件に適応する能力や、劣悪な環境での成長・ストレス下での回復力を持つ遺伝的要素や生理メカニズムを備えているが、近代的な農業の中では十分に活用されてこなかった。データ駆動型育種をはじめとする先端的な育種技術は、NUSがもつ環境適応性や機能性の潜在能力を引き出し、持続可能な農業への貢献が期待されている^{10,11}。スピード育種¹²、ゲノム編集¹³、ゲノミック選抜¹⁴などの技術が活用される一方、農家参加型育種との組み合わせによる試みも進められている^{15,16}。我々は薬用ジソを対象にデータ駆動型育種を実施し、従来品種を大きく上回る薬効成分を含む系統を得ることに成功した。

混作とデータ駆動型育種

現代の食料生産システムは均一化が進み、多様性の低下とともに病虫害や異常気象への

脆弱性が増大している。このような状況を背景に、欧米をはじめとする先進国では、異種混作や同種混作（品種混合）といった多様化戦略が再評価されており、これによって投入資材の削減と収量の安定化・増加が期待されている¹⁷。混作に適した理想的な品種像 (ideotype) は単作とは異なり、初期段階から混作を考慮した育種過程の設計が重要となる¹⁸。また、量的遺伝学的モデルも単作とは異なるものが必要となる¹⁹。さらに、ゲノム情報を活用した予測を基に最適な遺伝子型の組合せを発見するスキームが必要とされる^{20,21}。こうした育種を進める上でデータ駆動型のアプローチは不可欠と考えられる。

農家参加型のデータ駆動型育種

NUS は気候変動や限界環境への適応に重要な形質の供給源であり、データ駆動型育種と組み合わせることでその潜在能力を引き出せる。しかし、選抜が実際の栽培環境と一致しなければ、農家のニーズに合わない品種が生まれる。これを防ぐため、農家参加型の評価・選抜が不可欠である^{15,16,22}。例えば、農民参加型の三者比較 (tricot) に基づく評価は、農家の実際の環境に適した品種をより精度高く推奨できる可能性を示している^{23,24,25}。

今後の展望

データ駆動型育種は、育種の各工程を合理化し、効率化と高速化を実現するアプローチであり、多様な場面での活用が期待される。その実装には、データ計測・解析・最適化手法の開発に加え、生産者、研究者、企業、政策立案者など多様なステークホルダーの協働が不可欠である²⁵。こうした連携を通じて、多様な作物の改良を促進し、気候変動下における食料生産の持続可能性と安定性の向上に貢献できる。

[1] [Toda et al. \(2021\) Plant Genome 14:e20157](#); [2] [Sakurai et al. \(2022\) Plant Genome 15:e20244](#); [3] [Okada et al. \(2024\) Plant Phenomics 6:0244](#); [4] [Toda et al. \(2022\) Front Plant Sci 13:828864](#); [5] [Sakurai et al. \(2023\) Front Plant Sci 14:1201806](#); [6] [Toda et al. \(2024\) Theor Appl Genet 137:77](#); [7] [Diot & Iwata \(2023\) Front Plant Sci 13:1050198](#); [8] [Hamazaki & Iwata \(2024\) Front Plant Sci 15:1361894](#); [9] [Sakurai et al. \(2024\) G3:jkae224](#); [10] [Kamenya et al. \(2021\) Theor Appl Genet 134: 1787](#); [11] [Shorinola et al. \(2024\) Nat Comm 15:320](#); [12] [Chiurugwi et al. \(2018\) Theor Appl Genet 132:607](#); [13] [Lemmon et al. \(2018\) Nat Plants 4:766](#); [14] [Yabe et al. \(2018\) Front Plant Sci 9:276](#); [15] [Fadda et al. \(2020\) Front Plant Sci 11:559515](#); [16] [Woldeyohannes et al. \(2020\) eLife 11:e80009](#); [17] [Li et al. \(2023\) PNAS 120:e2201886120](#); [18] [Moore et al. \(2022\) Front Plant Sci 13:843065](#); [19] [Firmat and Litrico \(2022\) Front Plant Sci 13:733996](#); [20] [Wolfe et al. \(2021\) Front Plant Sci 21:665349](#); [21] [Bancic et al. \(2021\) Front Plant Sci 12:605172](#); [22] [Gesesse et al. \(2023\) PNAS 120:e2205774119](#); [23] [van Etten et al. \(2019\) PNAS 116:4194](#); [24] [de Sausa et al. \(2021\) Commun Biol 4:944](#); [25] [van Etten et al. \(2023\) PNAS 120:e2205771120](#)

遺伝資源開発による高温・乾燥耐性コムギ育種への挑戦

辻本 壽

鳥取大学乾燥地研究センター

【はじめに】

気候変動が進む中、人口はさらに 20 億人も増加すると予想されている。単純に考えても、これら増加する人口を養う量の食糧増産が必要であるが、気候変動に起因する様々な気象現象の頻発、豊かな土壌の減少、真水や肥料資源の枯渇などが食糧増産の障害となっている。また、農業が環境に与える影響も無視することができず、温暖化を加担することにも知られている。食料を持続的に生産するためには、作物の品種改良、つまり育種はこれらの障害に打ち克つ効果的な農業技術であるが、この技術にもいくつかの課題がある。とくに、主要作物においてはこれまでの高度な育種によって遺伝的変異が小さくなっており、さらなる改良には大胆な遺伝資源の発掘により効果の高い遺伝子を見出すことが必要である。また、気候変動の速度に追いつくため育種を迅速に進めること、そのためにゲノム情報を利用して量的遺伝子座を追跡できる技術を開発すること、さらにはゲノム編集などの分子育種技術によって、既存品種において、ピンポイントに遺伝子を改変することなどが必要である。

本講演では、世界の三大穀物のひとつであり、世界で最も広い面積に栽培され、人類に 2 割のカロリーと 2 割のタンパク質を供与する穀物、コムギについて、演者らがアフリカスーダンの研究者と実施した国際共同研究の一端を中心に紹介する。

【遺伝資源開発】

育種は、異なる品種を交配して、その子孫から両親の良い形質を併せ持つ個体を選抜し固定する作業である。交配する組み合わせを確保するために多数の種子や栄養体がジーンバンクに保存されており、遺伝資源と呼ばれている。この中には在来品種や古い品種、さらには、作物に近縁で交配が可能な野生種も含まれる。野生種は種内変異に富み、その中には効果の高い有用遺伝子があるかもしれないが、形態が現在栽培されている品種とは異なるため、収量性や環境耐性のような量的形質に関する有用遺伝子を正しく測定することが困難である。

そこで、私たちはまずパンコムギに野生種の染色体を 1 対のみ添加した系統を開発し、野生種の遺伝子の効果をコムギの形質として評価した。その中には、粒色の着色、高温耐性、生物的硝化抑制、内生菌と共生可能な系統等の有用形質を示すものが現れたが、染色体全体の添加では異数性の悪影響が現れるため、有用遺伝子の一部分をパンコムギに導入する緻密な染色体工学的手法が必要となり、実用化までに時間がかかると思われた。そのため、パンコムギと共通のゲノムをもつ直接の祖先種を用いようとしたが、これらはパンコムギと倍数性が異なり、植物の形態も大きく異なっている。そこで、まずは倍数性をそろえ、パンコムギの実用品種を 2 世代にわたり交配し、野生の形質を栽培種の形質で希釈

するとともに、通常の減数分裂によって、染色体の一部分をパンコムギに導入した系統を開発した。また、野生種がもつ種内変異をできるだけ広く調査するため、世界の様々な地域で採集された野生種の系統を交配親として用いて、多様性のきわめて高いパンコムギの集団を育成した。

【系統の高温耐性評価と遺伝分析】

遺伝的に多様な集団を作った次は、それらの高温耐性評価である。「高温」を摂氏何度に規定するか、生育のどの時期に高温を暴露するかなどの条件を考えねばならないが、私たちは、この多様性集団を現に高温障害が発生しているスーダン中部のワドメダニに持ち込み栽培試験を行った。そして、現地の育種家とともに耐性を示すと思われる個体を目視で選抜した。ワドメダニのコムギ栽培期間の最高温度は常にコムギの生育可能最高温度である摂氏 32 度を超えていた。現地で選抜した系統を日本に持ち帰り、昼温を 38 度にした人工気象器で栽培したが、これらの系統はこの条件でも良好に生育した。次に、これらの系統のゲノム DNA を調査し、DNA マーカーとの連鎖によって、高温耐性に関連する遺伝子座を同定した。高温耐性は量的形質であるため、その座位は予想通り複数の染色体部位に存在することが明らかになったが、無数にあるというものではなかった。そこで、これらマーカーを頼りにスーダンの実用コムギに遺伝子を導入した系統を育成しはじめている。

【量的形質の迅速育種】

地球温暖化は多くの人々が予想するより早い速度で進んでおり、15 年以上年月のかかる通常のコムギ育種で捉えることが難しい。そこで、人工気象器を用い 1 年間に複数世代栽培する育種の迅速化が必要である。しかし、迅速育種では小型の植物となるため、各世代において量的形質を測定することができない。上記の研究で、高温耐性に関する遺伝子座を同定でき、量的形質にも迅速育種法を適用することが可能となった。耐性遺伝子座を現在の品種に導入することで、高温耐性を高められると期待している。

【高温耐性の分子機構の解明】

これまでの研究で、高温耐性に関して、熱ショックタンパク質の合成、活性酸素種除去、浸透圧調節、細胞膜安定化など様々な分子機構の報告がある。そこで、選抜した系統を調査したが、耐性系統に顕著な差異は見られなかったため、選抜した系統を摂氏 38 度の高温に暴露し 48 種の代謝物を調査した。通常系統は、高温に応答し代謝物のプロファイルが大きく変化するのに対し、耐性系統は代謝物に特別な変化が見られず、高温に耐えているのではなく、38 度の温度を高温だと感じていないように思われた。

【結論】

私たちが選抜した高温耐性系統の分子機構は明らかではなく、今後の研究にゆだねることになるが、いずれにせよ、選抜した系統は、今後の育種に有用な遺伝資源として利用することができるでしょう。

講演者プロフィール

敬称略・講演順

【長谷川 利拡（はせがわ としひろ）】

1996年 博士(農学)京都大学大学院農学研究科。1990年、九州東海大学助手。その後、同大学で講師、1997年からは北海道大学で助手、助教授。2003年からは独立行政法人 農業環境技術研究所で主任研究員、上席研究員を歴任し、2016年からは国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センターのグループ長、2021年農業環境研究部門でグループ長、研究領域長を歴任し、現職。著書 分担執筆

Bezner Kerr, Hasegawa et al, Food, Fibre, and Other Ecosystem Products. Climate Change 2022: Impact, Adaptation, And Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change <https://doi.org/10.1017/9781009325844.007>.

Hasegawa et al, 2025. Coping with Climate Change: An Evaluation of Agricultural Impacts and Adaptation in Japan. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2436-2_4 など

【林 絵理（はやし えり）】

2005年神戸大学経営学研究科博士前期課程修了、2022年千葉大学園芸学研究科博士課程修了(農学博士)。2008年より植物工場に関するフィールドリサーチを開始し、2015年 NPO 法人植物工場研究会(JPFA)国際部長に就任、2023年より現職。学術と産業そして市民の経済および社会活動の融合、研究と普及の促進、植物フェノタイピングを含む植物工場技術の進展に強い関心を有する。第31回国際園芸学会議(IHC2022)で植物工場に関するシンポジウム(S08 Advances in Vertical Farming)の共同コンビーナーを務め、千葉県柏の葉で開催された第1回 JPFA 植物工場国際シンポジウム(ISPF2023)では JPFA を主導した。書籍 Advances in Plant Factories: New Technologies in Indoor Vertical Farming (2023年 Burleigh Dodds Science Publishing)の共編者。日本学術会議連携会員、日本農学アカデミー会員。

【吉橋 忠（よしはし ただし）】

1972年東京都生まれ。専門は天然物化学、食品科学。1996年明治大学大学院修了、(国研)国際農林水産業研究センターに勤務。2005年博士(農学)取得。2009-11年、農林水産省農林水産技術会議事務局。食品科学者として、香り米の香り成分の生合成経路、制御機構を解明。一方、BNI 研究は1996年から参画し、国際農研 G.V.スバラオと共同で研究、BNI の化学面を担当。BNI 強化コムギの開発は、PNAS コッツアレリ賞(2021年)を受賞。また、トウモロコシの BNI 物質を解明し、さまざまな作物について BNI 能を活用するため、プロジェクトリーダーとして BNI 研究チームと共に取り組む。

【岩田 洋佳（いわた ひろよし）】

幼少期をタイ、インドネシアで過ごす。東京大学 農学部卒。東京大学 大学院農学生命科学研究科で博士号を取得。統計学・情報科学と農学の融合をテーマに、農研機構で研究に従事後、2010 年より東京大学 生物測定学研究室 准教授、2023 年より教授。現在は、ゲノム科学と情報科学の融合による育種の効率化、植物と微生物の相互作用の育種を介した強化、リモートセンシングを用いた農業・林業の効率化などを主な対象に研究を展開中。

【辻本 壽（つじもと ひさし）】

1958 年大阪市生まれ。1981 年神戸大学農学部を卒業し、京都大学大学院農学研究科農林生物学専攻に進学。1986 年農学博士を取得後、横浜市立大学木原生物学研究所に助手、後に助教授として勤務。この間に、米国カンザス州立大学コムギ遺伝学遺伝資源センター客員研究員。2002 年鳥取大学農学部教授に就任、2011 年同大学乾燥地研究センターに配置転換。2022 年同センター長。2024 年に退職し、現在鳥取大学名誉教授および特任教授。学生時代より一貫してコムギ遺伝学の研究を実施。日本育種学会奨励賞、日本育種学会賞、日本農学会賞/読売農学賞等を受賞。日本育種学会名誉会員、日本学術会議連携会員。

講演内容や要旨に関して、記事等で公表する場合は、必ず事前に
(公財)農学会事務局にご相談の上、許可を得てください。

☎ 03-5842-2210 ✉ zaidan@nougakkai.or.jp