
植物バイオテクノロジー報告書

September 2025

バイオテクノロジー研究会



特定非営利活動法人

国際生命科学研究機構

International Life Sciences Institute Japan

International Life Sciences Institute, ILSI は、1978年にアメリカで設立された非営利の団体です。ILSI は、科学的な視点で、健康・栄養・安全性・環境に関わる問題の解決および正しい理解を目指すとともに、今後発生する恐れのある問題を事前に予測して対応していくなど、活発な活動を行っています。現在、世界中の400社以上の企業が会員となって、その活動を支えています。多くの人々にとって重大な関心事であるこれらの問題の解決には、しっかりとした科学的アプローチが不可欠です。ILSI はこれらに関連する科学研究を行い、あるいは支援し、その成果を会合や出版物を通じて公表しています。そしてその活動の内容は世界の各方面から高く評価されています。アメリカ、ヨーロッパをはじめ各国で、国際協調を目指した政策を決定する際には、科学的データの提供者としても国際的に高い信頼を得ています。特定非営利活動法人国際生命科学研究機構（ILSI Japan）は、ILSI の日本支部として1981年に設立されました。ILSI の一員として世界的な活動の一翼を担うとともに、日本独自の問題にも積極的に取り組んでいます。

まえがき

2025.9

バイオテクノロジー研究会

2025年の植物バイオテクノロジー報告書第3号（通算第71号）をお届けします。

本号では、植物バイオテクノロジーに関する基礎的な知見として、No.675ではバナナにおけるゲノム編集技術の応用について、No.676ではカナダにおける除草剤抵抗性雑草の発生に関する調査研究について、No.677ではプロトポルフィリノーゲン IX オキシダーゼ阻害型除草剤について、No.678ではシロイヌナズナの形質転換法が応用できない事例とその原因について、No.679では主要作物における高温ストレスが花粉及び収量に及ぼす影響について紹介しています。

さらに、No.674では合成生物学の発展に伴う技術的な意義と倫理的な課題について紹介しています。

なお、これまでの調査報告書は、以下の URL で閲覧可能です。

<http://www.ilsijapan.org/ILSIJapan/COM/Rcom-bi.php>

植物バイオテクノロジー報告書の送付方法には郵送とメール配信の2種類がございます。送付方法の変更、もしくは送付停止を希望される方は ILSI 事務局（ilsijapan@ilsijapan.org）までご連絡ください。

目次

No.674	合成生物学における本質的な「生命の価値」に関する分析 Analysis of the intrinsic value of life in the context of synthetic biology	1
No.675	より優れたバナナ開発のための CRISPR/Cas ベースの遺伝子編集の応用 Application of CRISPR/Cas-based gene-editing for developing better banana	3
No.676	除草剤抵抗性雑草の発生率：カナダ・プレーリーにおけるケーススタディ Rate of herbicide resistant weed development: A Canadian Prairie case study	5
No.677	作物におけるプロトポルフィリノーゲン IX オキシダーゼ (PPO) 阻害型除草剤抵抗性の 背後にある生物学および農学的な結びつき The biological and agronomic nexus behind Protoporphyrinogen IX Oxidase (PPO) -inhibiting herbicide resistance in crops	7
No.678	ロスト・イン・トランスレーション：シロイヌナズナで得た知見が他の植物には“翻訳で きなかった”事例から私たちが学ぶべきこと Lost in translation: What we have learned from attributes that do not translate from Arabidopsis to other plants	9
No.679	経済的に重要な作物における花粉粒と収量への高温の影響に関する総説 Effect of high temperature on pollen grains and yield in economically important crops: a review	11

No.674

Analysis of the intrinsic value of life in the context of synthetic biology

合成生物学における本質的な「生命の価値」に関する分析

Zhang *et al.*

2025

Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 13:1536403.

DOI: 10.3389/fbioe.2025.1536403

合成生物学は、遺伝子組換えやゲノム編集など元々存在する生物を改変する技術とはまた一線を画す技術であり、合成生命への考え方が重要視されると考えられる。本稿では、合成生命体の倫理的価値に基づく捉え方と、合成生物学の発展に伴って人類が対応するかもしれない課題について考える良い機会になると考え選定した。

- ✓ 合成生物学は、分子生物学、遺伝学、情報科学、工学などが融合して DNA などの遺伝情報を設計・合成することで、新たな生命体を作成する。
- ✓ 現在の技術では、ウイルスや細菌のゲノムを人工的に再構築し、生存・増殖可能な細胞の作出などが報告されている。
- ✓ 合成生命の創出は、医療、農業、環境保全、エネルギー開発など多くの分野に革新的な応用が期待されている一方で、「生命とは何か」「人はどこまで生命を操作してよいのか」という倫理的問題がある。
- ✓ 「合成生命」は、単なる遺伝子改変とは異なり、人間が意図的に生命の構造や機能を再設計・構築することにより創られた存在であり、作出過程には自然界に存在しない新たな遺伝子を合成して導入する方法、自然に存在しない機能や代謝経路を構築する方法などが含まれる。
- ✓ 合成生命には、ボトムアップ型：分子レベルから細胞機能を構築する原始細胞やプロトセルと、トップダウン型：既存の生命体をベースに、ゲノムを改変・削減・再構築する 2 タイプがある。
- ✓ 合成生命は、自然生命とは異なる「人工的な生命史」を持ち、倫理的な評価や法的な位置づけも異なる必要がある。
- ✓ 内在的主観的価値は、人間が文化的・歴史的・社会的・美的観点から特定の存在に見出すものである。例えば、合成酵母は「科学の進歩」の象徴として評価され、合成脊椎動物は「倫理的な畏敬」を呼び起こす可能性がある。合成生命を「バイオアート」として扱う芸術的価値も存在する。
- ✓ 内在的客観的価値は、生命がもつ自己維持・自己保存・自己調整といった「自然な目的」に基づき、人間がどう評価するかとは無関係に、その存在そのものに宿る構造的価値である。合成生命も、生存を目指し目的指向的にふるまう存在であれば、この価値を持っており、たとえ完全人工であっても一定の自己統制を持つ合成生命には客観的な価値があるとみなすことができる。

- ✓ 固有の価値は、人間が道徳的にその存在を尊重すべきか否か、すなわち道徳的な地位についての基準である。痛みを感じる能力、主観性、意識、合理性などを備える存在は、より高い固有の価値を持つとされる。例えば、合成脊椎動物や合成人間には、特に高い道徳的地位が生じる可能性があり、この価値を持つ存在に対しては、利用や実験に際して配慮と規制が必要になる。
- ✓ 以上から、最も高い価値と道徳的義務を持つ合成生命は合成人間、次いで合成脊椎動物、合成無脊椎動物、合成微生物の順で示され、これらは人間との関係性・感情移入・文化的親和性に応じて道徳的義務の度合いが変化し、より上位の生命ほど、社会がその生命に対して注意深く接することが期待される。
- ✓ こうした価値や道徳的義務の違いによって、生じる研究・開発・政策に向けた留意点を示す。
- ✓ 合成微生物には道徳的義務は少ないとされるが、生態系や人類へのリスクに配慮し「予防原則」に基づく管理が求められる。
- ✓ 合成動物や合成人間に類する実体を扱う場合、倫理審査、透明性、社会的対話が不可欠である。
- ✓ 医療や環境修復など、公共の福祉に資する分野での利用は正当化されやすいが、商業的利益や利便性のみを追求し、固有の価値を持つ合成生命を損なう行為は問題視されるであろう。
- ✓ 「つくれるからつくる」ではなく「つくるべきか」の判断が必要となる。
- ✓ 社会・法制度の課題として、合成生命の種類や階層に応じた法的分類が必要となる。例えば、合成微生物はバイオセーフティやバイオセキュリティを重視し、合成動物・合成人間は、動物福祉・人格・人権・デジタル人格といった新たな法概念が必要になるだろう。さらに、法律だけでなく、社会的な対話の場の構築が求められる。
- ✓ 合成生物学の進展は、技術だけでなく人間の価値観の問い直しを迫っている。
- ✓ 「生命とは何か」「人はどこまで生命を設計・操作してよいのか」という根源的問題に対し、多様な立場からの議論が必要である。
- ✓ 合成生命体に段階的な価値と義務の違いがあることを理解し、科学と倫理、利用と制限のバランスを意識した社会的合意の形成が急務である。

(津田麻衣)

Application of CRISPR/Cas-based gene-editing for developing better banana

より優れたバナナ開発のための CRISPR/Cas ベースの遺伝子編集の応用

Tripathi *et al.*

2024

Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 12: 1395772

DOI: 10.3389/fbioe.2024.1395772

バナナ生産においてはゲノム編集で解決可能な多くの課題を抱えており、研究開発も盛んである。適用例や、今後の流通可能性を把握するために本総説は有用であると考え選定した。

- ✓ バナナ (*Musa* spp.) は、世界140カ国以上で栽培され、年間生産量は約 1 億5,300万トンに上り、約 4 億人の主食や重要な換金作物として利用されている。豊富な栄養価に加え、経済的重要性も極めて高く、国際農業貿易においても中心的な役割を担っている。特に熱帯・亜熱帯諸国では、小規模農家の生計を支える重要な作物である。
- ✓ バナナの栽培は深刻な生物的・非生物的ストレス要因にさらされており、Fusarium 萎凋病 (TR4) やブラックシガトカ病などの真菌性病害や、*Xanthomonas campestris* による BXW (バナナ萎凋病) などの細菌病害、BSV (バナナ条斑ウイルス) や BBTV (バナナバンチートップウイルス) といったウイルス病害の他、根部を侵害するゾウムシや線虫などの害虫、土壌浸食、栄養欠乏、気候変動等の非生物的要因がある。
- ✓ これらの課題は、特にアフリカやアジアでの収量格差や品質低下をもたらし、持続可能な栽培を困難にしている。
- ✓ バナナは主に *Musa acuminata* (AA ゲノム) と *Musa balbisiana* (BB ゲノム) の交雑により成立し、世界中で約1,000以上の品種が栽培されている。しかし、三倍体の栄養繁殖性が支配的であるため、従来の交配育種には限界があり、新たな育種戦略が求められている。
- ✓ CRISPR/Cas システムはバナナ改良に急速に導入され以下の開発がなされている。
- ✓ ケニアの国際熱帯農業研究所 (IITA) では、バナナ萎凋病 (BXW) の感受性遺伝子 (*MusaDMR6*, *MusaENOD3*) を CRISPR/Cas9 でノックアウトし、病原体に対する耐性を実証した。また、BSV に対しては、内在化したウイルス配列 (eBSV) を標的にマルチプレックス編集を実施し、発症を防ぐバナナの作出に成功した。
- ✓ ビタミン A の前駆体である β -カロテンの含有量を高めるため、リコペン ϵ -シクラーゼ (LCYe) 遺伝子をノックアウトした結果、果肉中の β -カロテン含量が最大 6 倍に増加。これは特にアフリカや南アジアなど栄養欠乏が懸念される地域での貢献が期待される。
- ✓ 半矮性品種: *MaGA20ox2* のノックアウトにより、草丈を抑えて風倒被害のリスクを低下させた半矮性品種の開発に成功している。
- ✓ エチレン合成に関与する *MaACO1* 遺伝子を編集することで、成熟速度を遅らせ、収穫後の保存性を改善。さらに、トロピック・バイオサイエンス社ではポリフェノールオキシダーゼを不

活性化し、褐変しないバナナの開発にも成功し、フィリピンでは非 GMO 判定を受けて流通が始まっている。

- ✓ 新しい技術の適用も進んでおり、Cas-CLOVER は CRISPR/Cas9の代替として開発された高精度編集技術で *MusaPDS* を標的にした実証が進行中である。
- ✓ その他、遺伝子の発現量調整により抵抗性やストレス応答を調節する CRISPRa/i（活性化・抑制型）技術や、一塩基レベルでの改変を可能にするプライム編集・塩基編集の利用も期待されている。
- ✓ バナナは栄養繁殖性作物であるため、導入した遺伝子を分離することが困難であり、CRISPR/Cas で作出された変異体も「GMO」として扱われる懸念がある。これに対し、RNP 導入や一過性発現系などを用いたトランスジーンフリー編集が試みられており、規制緩和に資する技術的進歩が求められる。
- ✓ CRISPR 関連特許の複雑さにより、商業化にはライセンス取得のハードルがある。また、消費者・農家の倫理的・社会的受容性を高めるため、非 GMO 型編集技術の普及と、透明な情報公開が重要である。
- ✓ バナナに対する CRISPR/Cas 技術の応用は、病害抵抗性の付与、栄養価の強化、成熟速度の調整など、多岐にわたる改良を可能にしている。新たな編集ツールや非 GMO 型の開発も進行中であり、今後、世界の食料安全保障に大きく貢献する可能性を秘めている。一方で、倫理的・法的課題を乗り越え、持続可能かつ公平な形で技術が活用される枠組み作りが求められる。

(津田麻衣)

No.676

Rate of herbicide resistant weed development: A Canadian Prairie case study

除草剤抵抗性雑草の発生率：カナダ・プレーリーにおけるケーススタディ
Sutherland *et al.*

2025

GM Crops & Food 16: 252-262.

DOI: 10.1080/21645698.2025.2477231

遺伝子組換えキャノーラ栽培における長年の除草剤使用による抵抗性雑草の発生状況は、当該キャノーラを拡大に栽培するカナダであるからこそその貴重な知見であり選定した。

- ✓ カナダのプレーリー地域における除草剤抵抗性（herbicide resistance: HR）雑草の出現は、農業の持続可能性と食料安全保障に大きな影響を及ぼす重要課題である。除草剤の登場により、20世紀後半以降の農業における雑草管理は大きく変化したが、その反復使用によって雑草が特定の除草剤に適応し、抵抗性を獲得する事例がカナダに限らず、アメリカやオーストラリアを含む世界各地で多く観察されている。
- ✓ 特にカナダのプレーリー地域では、乾燥気候と単一作物栽培の慣行（小麦と夏季休耕を中心とした二年輪作）により、除草剤の選択圧が高く、HR 雑草の進化が促進されてきた。20世紀半ばから夏季休耕地面積が拡大したため除草剤への依存度が増加し、その後、1990年代には遺伝子組換え（GM）除草剤耐性作物（HT 作物）の商業化により、耕起の必要性が軽減されて不耕起農法と輪作への移行が進んだ背景がある。
- ✓ 雑草の除草剤抵抗性は、同一の作用機序を持つ除草剤の繰り返し使用によって進化する。除草剤が植物の生命活動にどのように干渉するかによって抵抗性には以下の二種類がある。標的部位抵抗性（Target-Site Resistance: TSR）：除草剤の標的となる酵素やタンパク質に変異が起こり、除草剤が結合できなくなるもの、および非標的部位抵抗性（Non-Target-Site Resistance: NTSR）：除草剤の分解や排出が促進されるなど、標的以外の部位での適応が起こるもの。これは複数の作用機序にまたがって抵抗性を発現するケースが多く、管理が困難である。カナダでは NTSR の事例も報告されており、これが HR 雑草の多様性と防除の複雑さを増大させている。
- ✓ 1988年から2021年にかけて、プレーリー三州（アルバータ、サスカチュワン、マニトバ）で66件の新規 HR 雑草事例が報告されている。これは21種の雑草にわたっており、なかでもワイルドオート（14件うち6件が NTSR）、コキア（9件うち5件が NTSR）、エノコログサ（9件うち2件が NTSR）での発生報告が多い。
- ✓ 新規 HR 事例および複数の作用機序において抵抗性を示した数の年次推移では、いずれも長期的には緩やかな減少傾向を示しているが、後者は14例あり、決して落ち着きつつある状況とは言えない。
- ✓ HR 雑草に報告された除草剤のうち、脂肪酸合成阻害剤（アセチル CoA カルボキシラーゼ阻

- 害)とアミノ酸生合成阻害剤(アセト乳酸合成酵素阻害)のグループが全体の約70%を占めており、これらの除草剤は10回未満の散布で耐性が発現しうる高リスク群に属する。一方、別グループのグリホサートなどは低リスク群であり、耐性雑草の発生は少数にとどまっている。
- ✓ 1995年以降に導入された GMHT キャノーラの導入直後は HR 雑草事例が一時的に増加したものの、2000年代以降は減少傾向にある。
 - ✓ 特に注目すべきは、グリホサートに対する抵抗性事例が、66件中わずか5件である点である。これはアメリカにおける183件と比して著しく低く、HT キャノーラが「スーパー雑草」問題を引き起こしていないことを示している。
 - ✓ プレーリー地域の農家は、輪作と除草剤の種類の多様化により、HR 雑草の抑制に成功している。1991~1994年と2016~2019年の輪作調査では、豆類(エンドウ・レンズ豆)を含む農家の割合は30%から58%に増加し、4年輪作における作物種類の平均は2.6種から3.1種に増え、夏季の休耕実施割合は39%から2%へ減少した。
 - ✓ HT キャノーラ品種のローテーション(グリホサート、グルホシネート、イミダゾリノン耐性)も、特定の除草剤への過剰依存を回避している。
 - ✓ 米国では、トウモロコシ・大豆の2年輪作が耕地の約40%を占め、平均的な作物多様性は2.1種にとどまる(カナダより単純化している)。このことが、米国でのHR 雑草の多発(特にグリホサート耐性)に影響していると考えられる。
 - ✓ Kniss(2024)は、GM作物の導入はHR 雑草の出現率に顕著な影響を与えていないと報告しており、今回のカナダ事例と整合する。プレーリー地域では、農家による多様で持続可能な管理が奏功していることがうかがえる。
 - ✓ HR 雑草の完全制御は困難であるが、その個体群の拡大を抑制することは可能である。プレーリーの事例は、多様な作物・除草剤の輪作、複数の作用機序の除草剤使用によるローテーション戦略、耕起・播種・残渣処理など非化学的防除手法との組み合わせが重要であることを示している。
 - ✓ また、今後はHR 雑草の個体群動態の継続的モニタリング、スタック形質HT作物の適切利用とタンクミックス戦略の普及、新たな作用機序の除草剤の開発と導入、遺伝子・代謝レベルでのHRメカニズムの解明などが課題であろう。
 - ✓ カナダ・プレーリー地域の農家は、過去35年間にわたって除草剤抵抗性雑草の発生を抑制するため、輪作・MOAローテーション・HT作物の適切使用を組み合わせた総合的管理戦略を実践してきた。その結果、新規HR 雑草の発生率は比較的安定しており、アメリカに比してグリホサート抵抗性の拡大も抑えられている。農家の管理努力と制度的支援が、HR問題への対応の鍵である。

(津田麻衣)

The biological and agronomic nexus behind Protoporphyrinogen IX Oxidase (PPO) -inhibiting herbicide resistance in crops

作物におけるプロトポルフィリノーゲン IX オキシダーゼ (PPO) 阻害型
除草剤抵抗性の背後にある生物学および農学的な結びつき

Ali F et al.

2025

J. Experimental Botany Science DOI: 10.1093/jxb/eraf220

中国・南京大学及び江蘇州農業科学院による総説論文。PPO（プロトポルフィリノーゲン IX オキシダーゼ）阻害型除草剤に対する作物の抵抗性獲得メカニズムと、それを応用した持続可能な雑草管理戦略の開発に関する最新の研究動向をまとめた包括的な総説である。PPO 阻害剤の抵抗性は出現が遅く、従来の ALS 阻害剤やグリホサートに対する抵抗性雑草が急速に拡大している現状において、注目される除草剤となっている。

1) 背景

PPO は、植物の呼吸、光合成、窒素・硫黄同化、細胞死制御などに関わる重要な代謝経路であるテトラピロール生合成経路 (TBS) 上の最終段階であるプロトポルフィリノーゲン IX (Proto IX) からプロトポルフィリン IX (Proto IX) を生成する反応を触媒する。Proto IX は、クロロフィルとヘムの合成分岐点となる重要な中間体であり、この反応が阻害されると光感受性物質が細胞質に蓄積し、光照射下で ROS を生成して細胞死を誘導する。PPO 阻害剤に抵抗性を示す雑草は、商業化から50年で17種しか確認されていないことから、ALS 阻害剤やグリホサートなどと比べて抵抗性獲得が非常に遅い傾向がある。

2) PPO 阻害剤の作用機構と耐性の必要性

PPO 阻害剤は、Diphenyl ether (DPE) 系化合物を代表とし、PPO の基質結合部位に競合的に作用する。PPO が阻害されることで Proto IX が蓄積し、非特異的酸化により ROS が生成されて細胞が損傷を受ける。これらの除草剤に対して耐性を持つ作物を開発することで、除草効果を維持しつつ栽培作物への影響を回避することが可能となる。

3) PPO 阻害剤耐性獲得に向けた戦略

本論文では以下の7つの耐性獲得戦略が詳述されている。

- i. 組織培養法：タバコやダイズの細胞株に PPO 阻害剤を段階的に与えることで耐性細胞を選抜する。
- ii. 原核生物型 PPO 遺伝子の導入：細菌由来 (*Pectobacterium carotovorum*, *Bacillus subtilis*, *Myxococcus xanthus* など) の PPO 遺伝子を作物に導入し、除草剤に強い耐性を持つトランスジェニック作物 (イネ、ダイズ、トウモロコシなど) を開発。特に葉緑体標的型の発現が有効であることが報告されている。
- iii. アミノ酸置換変異：シロイヌナズナや緑藻由来の変異型 PPO (例: Ser305Leu, Tyr426Met,

Val389Met)により、除草剤結合部位の構造が変化し、除草剤の結合親和性が低下することで耐性が発現する。

- iv. Fe-キレターゼ過剰発現：*Bradyrhizobium*由来のFe-キレターゼ遺伝子を作物に導入することで、ヘム合成を促進し、光感受性中間体の蓄積を抑制。結果としてROS発生を抑え、PPO阻害剤に対する耐性が発現する。
- v. 概日時計遺伝子の改変：*GIGANTEA* (*GI*) 遺伝子をノックアウトした変異体では、抗酸化酵素の発現が増加し、ROSに対する防御能力が強化され、PPO阻害剤への耐性が確認された。
- vi. PPO遺伝子の過剰発現：野生型PPO遺伝子を過剰に発現させることで、酵素の総量が増加し、阻害剤の存在下でも酵素活性が維持され、成長が可能となる。
- vii. 遺伝子編集による耐性付与：CRISPR/Cas9を用いたベースエディター (CBE、ABE) やプライムエディター (PE) により、ターゲットアミノ酸の置換を行い、非トランスジェニックな耐性作物を開発。例として、イネ、コムギ、トウモロコシなどで成功例が報告されている。

4) 総括

PPO阻害剤は抵抗性雑草の出現速度が遅いため、持続可能な除草戦略として有望である。トランスジェニック法による耐性作物開発は実用化が進む一方、社会的な懸念を考慮し、非トランスジェニックな遺伝子編集技術の活用が今後重要となる。*PPO* 遺伝子の標的変異や代謝関連経路の制御によって、より安全かつ効率的な耐性作物の開発が期待される。

(小口太一)

Lost in translation: What we have learned from attributes that do not translate from Arabidopsis to other plants

ロスト・イン・トランスレーション：シロイヌナズナで得た知見が他の植物には“翻訳できなかった”事例から私たちが学ぶべきこと

Roeder AHK *et al.*

2025

Plant Cell 37: <https://doi.org/10.1093/plcell/koaf036>

米国、英国、中国、イタリアの大学および BASF の研究者による総説論文。モデル植物として広く利用されているシロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) で得られた知見が、他の植物種や作物にそのまま応用できない事例 (“翻訳できなかった”事例) に焦点を当て、その原因と意義について 8 つのテーマに分けて専門家が考察した総説である。

- 1) シロイヌナズナでは「フローラルディップ法」と呼ばれる画期的な形質転換法が有効であるが、他の植物、特に非アブラナ科植物では再現が困難である。これは、花の発達過程や子房へのアクセス性の違い、植物防御応答、アグロバクテリウムの持続性などが要因である。
- 2) 遺伝子の機能を他植物種に応用する際、オーソログ遺伝子の特定が難しい。これは、進化過程での遺伝子重複や欠失、種特異的な進化の影響によって、1対1の対応関係が崩れているためである。特に植物では、ほとんどの遺伝子ファミリーが複雑な系譜をたどっており、“翻訳”の精度を損ねる要因となっている。
- 3) 多くの陸上植物では、アーバスキュラー菌根 (AM) 共生を利用して栄養獲得を効率化しているが、シロイヌナズナは進化的に失っている。このため、AM 共生の研究においてシロイヌナズナは不適切なモデルである一方、失われた遺伝子群の比較解析により、共生に必要な遺伝子セットの特定が進んでいる。
- 4) 根の解剖学的構造にも種間差が大きい。シロイヌナズナの根は単層の皮層を持つが、多くの作物種は多層の皮層を有し、これが菌根共生や酸素供給 (通気組織の形成) と関係している。このような構造の違いは、シロイヌナズナを用いた研究成果の他種への応用を制限している。
- 5) シロイヌナズナは C₃型光合成植物であり、C₄型光合成に関する研究には不向きである。
- 6) ゲノムサイズの違いによる転写制御機構の相違も “翻訳” 困難性の一因である。シロイヌナズナのような小型ゲノム植物では、プロモーター領域が遺伝子に近接しているが、大型ゲノムの作物では遠隔制御領域 (distal enhancer) が一般的である。この違いにより、単純なプロモーター領域のクローン化では遺伝子発現制御が不十分となる場合がある。
- 7) 環境ストレス、特に水ストレスに対する表現型の “翻訳” も困難である。シロイヌナズナでのストレスに対する「適応」と作物の「収量保持」は異なる意味を持つ。このため、シロイヌナズナでのストレス耐性の評価方法や応答機構に関する知見を他植物種に翻訳することが困難なケースが多い。
- 8) 概日時計系は保存されているが、その調節機構には種特異性がある。作物種では光周期や温度

応答の調整において異なる転写因子が関与している場合があり、シロイヌナズナでの知見だけでは十分でない。

9) 総括

シロイヌナズナは依然として重要なモデル植物であるが、すべての植物現象の研究に適しているわけではないことが示された。むしろ、「翻訳できなかった」事例から得られる進化的多様性や制約の理解は、より広範な植物科学研究を進展させる鍵となる。著者らは、否定的結果やモデル外の知見の重要性を強調し、研究コミュニティに対して、シロイヌナズナを超えた多様な植物の利用と情報共有を呼びかけている。

(小口太一)

Effect of high temperature on pollen grains and yield in economically important crops: a review

経済的に重要な作物における花粉粒と収量への高温の影響に関する総説
Mehmood M *et al.*
2025
Planta 261:141

トルコ、パキスタン、エジプトの研究者による総説論文。近年の気候変動に伴い、地球規模での平均気温の上昇と異常気象の頻発が、農業生産に深刻な影響を与えている。とりわけ、植物の生殖構造は高温や乾燥に非常に敏感であり、花粉の生産、発芽、花粉管伸長、受精に至るまでの過程が影響を受け、結果として収量の著しい減少を招く。筆者らは、主要作物における高温ストレスが花粉に及ぼす影響を中心に、生殖障害が最終的に収量に与える影響について多角的に検討している。

1) 高温が花粉発達に及ぼす影響

高温は減数分裂の異常、染色体分離の失敗、タペート細胞の早期崩壊を引き起こす。とくにタペートは多くのミトコンドリアを含み、高温下で活性酸素種 (ROS) を過剰に生成し、プログラム細胞死 (PCD) を誘導する。これにより花粉形成が阻害され、雄性不稔を引き起こす。

2) プログミック段階に対する高温の影響

花粉の着床、発芽、管伸長、精細胞の移送といった一連のプログミック段階 (受粉から受精までの過程) のプロセスが高温で阻害される。柱頭の水分保持能力の低下、花粉の付着性や管伸長の障害、受精成功率の低下などが報告されている。

3) 干ばつが植物の生殖に与える影響

干ばつは花粉形成、花粉管伸長、葯の開裂を阻害し、雄性の生殖器官に特に影響を与える。糖代謝の異常や ROS の増加によって、タペートの退化遅延や花粉壁形成異常が起こる。イネ、コムギなどでは干ばつによる部分的な雄性不稔と収量低下が観察される。

4) 主要作物における具体的影響

- ・ コムギ：30℃を超えると花粉形成が阻害され、1℃の上昇で収量が50%以上減少する可能性。
- ・ イネ：35℃で花粉の発芽率や管伸長が顕著に低下し、不稔率が上昇。
- ・ トウモロコシ：花粉の感受性が高く、40℃で発芽率が著しく低下。CRISPR で雄性不稔遺伝子の解析も進行中。
- ・ ダイズ：花粉の形態異常、タペート崩壊、花の脱落が報告され、種子形成率が著しく低下。
- ・ ワタ：28℃を超えるとボールの着果率低下と花粉管成長阻害が見られる。
- ・ ヒマワリ：高温で花粉発芽率が30%以上低下。
- ・ トマト：果実着果率の低下は花粉活力と完全には一致せず、別要因も示唆される。アルゼンチンでは、コムギ生産の1/3がHB4コムギに置き換わると、CO₂放出の年間0.86~1.29 Mt 削減が可能と試算され、持続可能な農業の実現に貢献が期待されている。

5) 緩和戦略

耐暑性品種の選抜・育種は重要な解決策であり、花粉特性を指標としたスクリーニングが進められている。トマト、レンズマメ、ダイズ、ワタなどで、花粉発芽率や細胞膜の安定性を指標とした評価が導入されている。加えて、ゲノム編集技術（CRISPR/Cas9）により耐熱性遺伝子の改変や導入が進展している。

6) 総括

高温および干ばつは植物の有性生殖に深刻な障害をもたらし、花粉の発達・発芽・受精成功率に著しく影響する。これらの知見は、将来的な耐熱性作物の開発や農業の気候変動適応戦略において極めて重要である。

(小口太一)

植物バイオテクノロジー報告書

2025年9月 印刷発行

特定非営利活動法人
国際生命科学研究機構 (ILSI JAPAN)

理事長 宮澤陽夫

〒135-0004東京都江東区森下3-13-5

グローバルビル5F

TEL 03-6284-0877

FAX 03-6284-0878

[http:// www.ilsijapan.org](http://www.ilsijapan.org)