



国際農林水産業  
**研究成果情報**

— 2023 年度 —



**地球と食料の未来のために**



国立研究開発法人  
国際農林水産業研究センター



令和5年度 国際農林水産研究成果情報

プログラム	No.	研究成果情報/ 主要普及成果	分類	プロジェクト略称	PL名	執筆責任者1	執筆責任者2
			研究 成 果 情 報 名				
環境 (A)	A01	研究成果情報	研究	A1 気候変動総合	A1 泉 太郎	白木秀太郎	-
			メタ解析で解き明かされたイネの再生特性と再生イネの穂数依存型の収量構成				
	A02	研究成果情報	研究	A2 カーボンリサイクル	A2 小杉 昭彦	小杉昭彦	鶴家綾香
			微生物糖化法を効率化させる新規のキシラン糖化菌				
	A03	研究成果情報	研究	A2 カーボンリサイクル	A2 小杉 昭彦	谷尚樹	-
			降雨による滞水はオイルパームの幹上部での遺伝子発現を変動させる				
	A04	研究成果情報	研究	A3 BNIシステム	A3 吉橋 忠	大高潤之介	吉橋 忠
			トウモロコシの生物的硝化抑制 (BNI) の鍵となる物質を同定				
	A05	研究成果情報	研究	A4 環境適応型林業	A4 野口 正二	谷尚樹	-
			実生のゲノム情報からフタバガキの幹直径と樹高を予測するモデルの開発				
A06	研究成果情報	研究	A4 環境適応型林業	A4 野口 正二	田中憲蔵	-	
		熱帯林樹木テンバガサラノキとセラヤサラノキの種間雑種の干ばつへの強靱性					
A07	研究成果情報	研究	A5 熱帯島嶼環境保全	A5 安西 俊彦	濱田耕佑	中村智史	
		炭化物の施用深度の違いは窒素溶脱量と水収支を左右する					
A08	研究成果情報	研究	A5 熱帯島嶼環境保全	A5 安西 俊彦	菊地哲郎	安西俊彦	
		陸域から沿岸域へ流入する溶存有機物および鉄の変動要因を機械学習で解明					
A09	研究成果情報	研究	A5 熱帯島嶼環境保全	A5 安西 俊彦	濱田耕佑	岡 直子	
		窒素フットプリントを活用した窒素負荷・化学肥料の削減効果と資源循環の見える化					
食料 (B)	B01	研究成果情報	研究	B1 レジリエント作物	B1 藤田 泰成	朴チョル	許 東河
			脂質含量を減らさずにタンパク質含量を高める野生ダイズ由来対立遺伝子				
	B02	研究成果情報	研究	B1 レジリエント作物	B1 藤田 泰成	永利友佳理	藤田泰成
			畝を用いた圃場における作物干ばつストレス実験系の開発				
	B03	研究成果情報	研究	B1 レジリエント作物	B1 藤田 泰成	永利友佳理	藤田泰成
			植物の新たな干ばつストレス応答メカニズムの解明				
	B04	研究成果情報	研究	B1 レジリエント作物	B1 藤田 泰成	植田佳明	-
			植物の硝酸イオン吸収を数理モデルにより予測				
	B05	研究成果情報	研究	B2 新需要創造	B2 圓山 恭之進	浅井英利	Aung Zaw Oo
			適切なリンの肥培管理により黒米の生産性と品質を両立できる				
	B06	研究成果情報	研究	B3 越境性害虫	B3 小堀 陽一	小堀陽一	-
			ツマジロクサヨトウの殺虫剤感受性を国際間で比較するための簡易検定法				
	B07	研究成果情報	研究	B5 アフリカ稲作システム	B5 辻本 泰弘	高井俊之	-
			穂数を増加させる量的遺伝子座MP3は高CO2環境でイネを増収させる				
	B08	研究成果情報	研究	B5 アフリカ稲作システム	B5 辻本 泰弘	石崎琢磨	植田佳明
ゲノム編集でOsTB1 遺伝子の機能を弱めたイネはリン欠乏条件での収量性が高い							
B09	主要普及成果	技術	B5 アフリカ稲作システム	B5 辻本 泰弘	西垣智弘	辻本泰弘	
		含水比に基づくリン施肥診断に有効な土壌のリン吸着能の簡易推定法					
B10	研究成果情報	技術	B5 アフリカ稲作システム	B5 辻本 泰弘	辻本泰弘	Aung Zaw Oo	
		水稲へのリン浸漬処理P-dippingは冠水害の回避にも有効					
B11	研究成果情報	技術	B5 アフリカ稲作システム	B5 辻本 泰弘	辻本泰弘	Aung Zaw Oo	
		水稲へのリン浸漬処理P-dippingは4.5~6.5葉程度の苗を用いると増収効果が高い					
B12	研究成果情報	研究	B6 アフリカ畑作システム	B6 中村 智史	伊ヶ崎健大	南雲不二男	
		有効土層の薄い土壌型プリンソルにおけるソルガムの特異な施肥応答					
B13	研究成果情報	研究	B6 アフリカ畑作システム	B6 中村 智史	井関光太郎	伊ヶ崎健大	
		土壌型プリンソルにおけるササゲ栽培では施肥と密植による増収効果が高い					
B14	研究成果情報	研究	B6 アフリカ畑作システム	B6 中村 智史	井関光太郎	伊ヶ崎健大	
		スーダンサバナの栽培データを用いて気候変動がササゲ栽培に及ぼす影響を推定					
B15	研究成果情報	研究	理事長インセンティブ	生物資源・利用 柳原 誠司	山中直樹	-	
		ダイズさび病抵抗性品種KinoshitaとShiranuiは2つ目の抵抗性遺伝子を有する					
情報 (C)	C01	研究成果情報	技術	C2 実用化連携	C2 Marcy Nicole Wilder	中山正和	-
			統合環境制御と補光の併用は亜熱帯地域のイチゴ生産を増収させる				
	C02	研究成果情報	研究	C4 熱帯作物資源	C4 山中 慎介	寺島義文	-
サトウキビとエリアンサスの属間交配によりサトウキビ根系特性の改良が可能である							
C03	研究成果情報	研究	C4 熱帯作物資源	C4 山中 慎介	松田大志	寶川拓生	
パッションフルーツの高温域での光合成能は非ストレス条件下の蒸散能で決まる							

## メタ解析で解き明かされたイネの再生特性と再生イネの穂数依存型の収量構成

親イネ（一期作）に比べて、再生イネ（再生二期作）の穂数は19%増加する一方、生育期間は41%短縮し、一穂籾数や籾収量はそれぞれ48%、56%減少する。また、生育期間の短縮は、草丈、穂長、籾収量の減少に影響を与える。すなわち、再生イネの株出し栽培は、出穂を早め、幼穂分化を制限し一穂籾数を半減させ、収量を穂数に依存する収量構成へと転換させることを示唆している。

キーワード：水稻、ひこばえ、再生能、メタ解析

### 背景・ねらい

再生二期作は、育苗、代かき、田植えを省略できるため、低投入・低コストの栽培方法として注目される一方、慣習の水稻二期作に比べ、大きく減収する点が課題である。特にアジアでは近年、農業労働者の高齢化や減少が深刻化しているため、再生二期作への関心が高まっており、これまでに、再生能\*の高い品種や形質の探索に関する研究が数多く実施されている。しかし、遺伝的・環境的要因の違いから、研究間で異なる見解も多く、イネの再生特性を分かりにくくしている。

本研究では、世界14か国で実施された51件の栽培試験データを用いたメタ解析\*\*により、イネの収量性、早晚生、栽培地などの栽培条件の違いが収量関連形質の再生能に与える影響を評価し、イネの再生特性と収量性との関係について明らかにすることを目的とする。

\*本研究では再生能（あるいは再生率）を親イネと再生イネの最終的な生長比と定義する。

\*\*複数の研究結果を統合し、全体像や傾向を明らかにする手法。

### 成果の内容・特徴

- 1976年から2022年までの親イネと再生イネの栽培試験データから、9つの収量関連形質（草丈、茎数、穂長、一穂籾数、穂数、千粒重、登熟歩合、生育期間、籾収量）および栽培地や施肥量等の栽培条件の情報を抽出し、データベースを構築する。統計分析手法を用いて、収量関連形質の再生率、品種（収量性、早晚性）や栽培環境（地域、窒素施用量）などの遺伝的および環境的要因の差異が再生率に与える影響、再生率と収量性との関係を明らかにする。
- 再生イネの生育期間は、親イネに比べて41%短縮し、一穂籾数や籾収量はそれぞれ48%、56%と大きく減少する一方で、茎数や穂数はそれぞれ19%の増加に留まる（図1）。これらの結果は、再生イネ栽培は収穫を早め、収量構成要素の役割を変化させることを示している。親イネでは収量構成が1つの穂に多くの籾をつけることで収量を確保する「穂重型」に対して、再生イネ

は穂の数が多く小さい穂をつけることで収量を確保する「穂数型」となる（図2）。

- 再生イネの茎数は、品種や栽培環境などの遺伝的および環境的要因の影響を受けやすく、変動しやすい一方、一穂籾数、生育期間、千粒重は比較的影響を受けにくいことを示唆している（図3）。
- 各形質の再生率における相関・因果関係の分析から、生育期間は籾収量、草丈、穂長に、穂長は一穂籾数に、そして茎数は草丈、穂数に有意な直接効果（ $p < 0.05$ ）を示す（図4）。つまり、再生イネの生育期間の短縮により出穂が早まることで、一穂籾数の決定に影響を与える茎頂の生育や幼穂分化が制限される一方、穂数はそれほど増加しないため、その結果として籾収量が減少することを示唆している。

### 成果の活用面・留意点

- 再生率は再生二期作における適用品種、栽培環境の適応性、栽培技術に対する評価指標として、品種や栽培管理技術の開発に活用できる。
- 再生イネの収量は穂数に大きく左右されるため、イネの再生を促進させ、茎数を確保することが重要な栽培管理の一つとなる。
- 本研究はメタ解析により、イネの再生特性の一般的な傾向を示したものであり、特定の栽培条件や品種によっては再生率の差異が大きくなる可能性がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [A1 気候変動総合（第5期）]、外部資金 [科研費 20K20456]

研究実施期間：2021～2023年度

研究担当者：白木秀太郎（農村開発領域）、Kywae, Thura, Lae, L.M., Thin, M.C., Kyaw, M., Nwe, N., May, T.O., Loon, P.P., Aung, K.T.（ミャンマー農業研究局）

発表論文等：Shiraki et al. (2024) *Agron. J.* 1–16. <https://doi.org/10.1002/agj.2.21521>

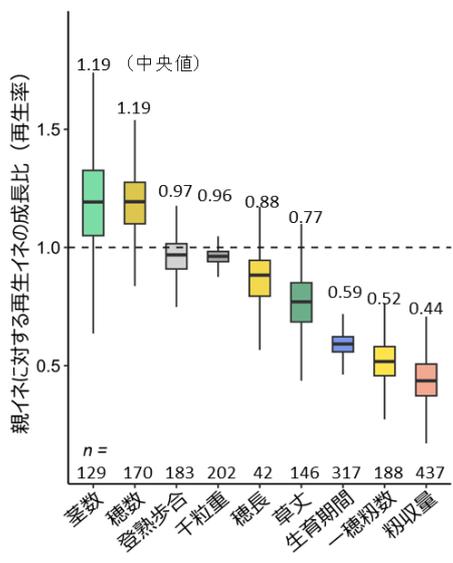


図1 各収量関連形質の親イネに対する再生イネの成長比（再生率）

箱ひげ図はデータの分布を表し、ひげの上端が最大値、下端が最小値、箱内の線が中央値（図中の数値）を示す。nはデータ数。

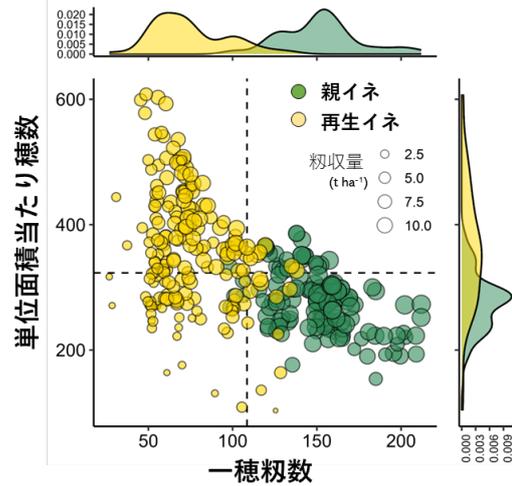


図2 親イネと再生イネの単位面積当たり穂数と一穂粒数との関係 データ数 n = 170

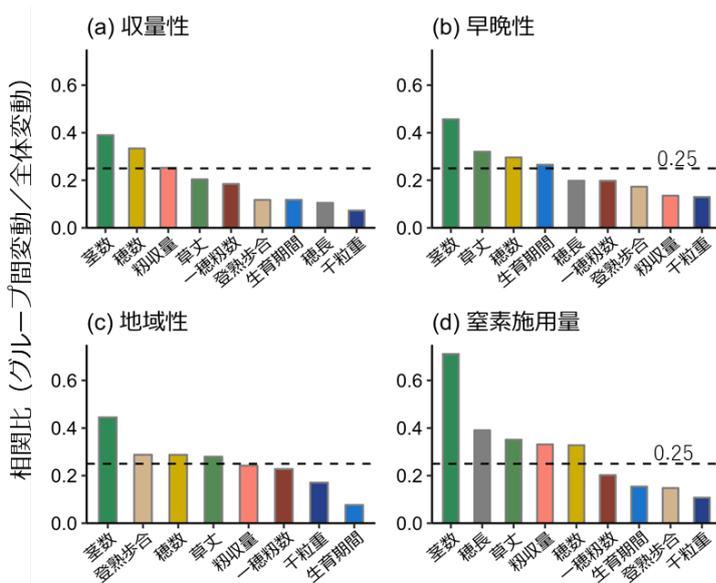


図3 品種や栽培管理などの遺伝的および環境的要因の差異が収量関連形質の再生率に与える影響

相関比とは、質的データ（大、中、小などのグループ）と量的データの関係の強さを示す指標（例えば、早生、中生、晩生品種の違いは再生率をどれだけ変動させるのか）。一般的に相関比 0.1 未満で「相関なし」、0.1 以上で「相関あり」、0.25 以上で「やや強い相関」を示す。グループ分けは(a)収量性が小収（平均 4.0 t ha<sup>-1</sup>）、中収（平均 6.5 t ha<sup>-1</sup>）、多収（平均 9.0 t ha<sup>-1</sup>）、(b)早晩性が早生（平均 110 日）、中生（平均 130 日）、晩生（平均 147 日）、(c)地域性が南・東南アジア、東アジア、アメリカ、アフリカ、(d)窒素施用は少肥（100 kg N ha<sup>-1</sup> 未満）、中肥（100 kg N ha<sup>-1</sup> 以上 300 kg N ha<sup>-1</sup> 未満）、多肥（300 kg N ha<sup>-1</sup> 以上）である。

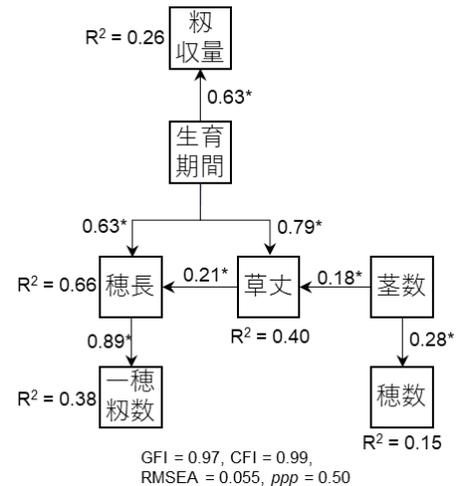


図4 各収量関連形質の再生率における相関・因果関係の分析

形質間の数値はパス係数（\* $p < 0.05$ ）、 $R^2$ は決定係数を示す。例えば、生育期間比が1.0 増えると収量比が 0.63 増える。各適合度指標(GFI, RMSEA, CFI, ppp)の値からモデルは適合する。

## 微生物糖化法を高効率化させる新規のキシラン糖化菌

リグノセルロースのバイオマス利用においてセルロース・キシランの安価で効率的な糖化法は重要な技術である。石垣島の堆肥から新たに見出した新属新種の好熱嫌気性細菌 *Insulambacter thermoxyylanivorax* は高効率にキシランを分解する。微生物糖化法で用いるセルロース糖化能の高い *Clostridium thermocellum* と本菌を共培養すると、キシランを多く含むバイオマスの糖化を向上させる。

キーワード：バイオマス、キシラン、微生物糖化、セルロース

### 背景・ねらい

農業生産により副次的に生じる農産廃棄物の多くは、リグノセルロースと呼ばれるバイオマスであり、主にセルロースやヘミセルロースで構成される。リグノセルロースバイオマスは地球上最も豊富な再生可能資源として注目されており、その有効活用が求められている。しかし、効率的で安価なバイオマスの糖化技術の開発が課題であり、国際農研では、市販セルロース糖化酵素（セルラーゼ）に依存せず、糖化微生物の培養だけで糖化することができる「微生物糖化法」（令和4年度研究成果情報「セルラーゼ酵素を使用せずに「微生物の培養だけ」でセルロースを糖化する技術」）を開発している。一方、農産廃棄物によっては、セルロースだけでなくキシランを多く含むバイオマスもある。キシランはセルラーゼ酵素の糖化を阻害するため、微生物糖化法へ組み込めるキシラン糖化微生物の探索とそれを使った糖化技術の開発が求められている。

### 成果の内容・特徴

1. キシランを唯一の炭素源とする培地を用いて、石垣島の堆肥から嫌気環境下 60°Cにてキシランを効率的に糖化させる微生物をスクリーニングし、DA-C8 菌を得る。本菌は、既知の *Xylanibacillus composti* と同じ系統に属するが、デジタル DNA-DNA ハイブリダイゼーション、平均アミノ酸配列同一性値、主要極性脂質組成等の遺伝学的、化学分類学的および系統学的解析から、新たに新属新種 *Insulambacter thermoxyylanivorax* に命名する（図1）。
2. *I. thermoxyylanivorax* DA-C8 は、キシランを完全に糖化できるだけでなく（図2）、アラビノキシランやガラクトンなど、キシラン以外のヘミセルロースも糖化する。また生育温度 37~60°C（至適温度 55°C）や生育 pH4.0~11.0（至適 pH9.0）と広範囲な温度や pH でも生育する。
3. キシランが比較的多く含有されるオイルパームヤシ殻

（EFB）繊維を用いた微生物糖化試験では、セルロース糖化能の高い *Clostridium thermocellum* の糖化能は単独で 24.7%、*I. thermoxyylanivorax* DA-C8 では 13.2%であるのに対し、*I. thermoxyylanivorax* DA-C8 と *C. thermocellum* と共培養した場合の糖化能は 58.1%であり、極めて高い糖化効率を示す。これは各々単独の場合と比較し、2倍~4倍の糖化能力の向上が認められる（図3）。

4. *I. thermoxyylanivorax* DA-C8 は、基準株として理研バイオリソースセンター(JCM 34211<sup>T</sup>)とドイツ微生物細胞培養コレクションセンター(DSM 111723<sup>T</sup>)に寄託されており、分譲が可能である。

### 成果の活用面・留意点

1. EFB 以外でも、トウモロコシ茎・葉・芯、稲わらなどキシランの多く含まれる繊維において、*C. thermocellum* と本菌を共培養すると微生物糖化法の糖化効率の向上が認められる。
2. *I. thermoxyylanivorax* DA-C8 は、嫌気条件下だけでなく、好気条件でも培養することが出来るが、好気培養条件ではキシラン糖化酵素遺伝子の著しい発現抑制が認められ、酸素による代謝制御を受ける\*（発表論文2）を参照）。

### その他

予算区分：交付金プロ [カーボンサイクル（第5期）]、外部資金 [SATREPS]

研究実施期間：2021~2023年度

研究担当者：鶴家綾香（生物資源・利用領域）、Chhe, C.（筑波大（現カンボジア王立農業大学））、小杉昭彦（生物資源・利用領域）

発表論文等：1) Chhe et al. (2021) *J. Biotechnol.* 342: 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.10.008>

2) Chhe et al. (2023) *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 73: 005724. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.005724>

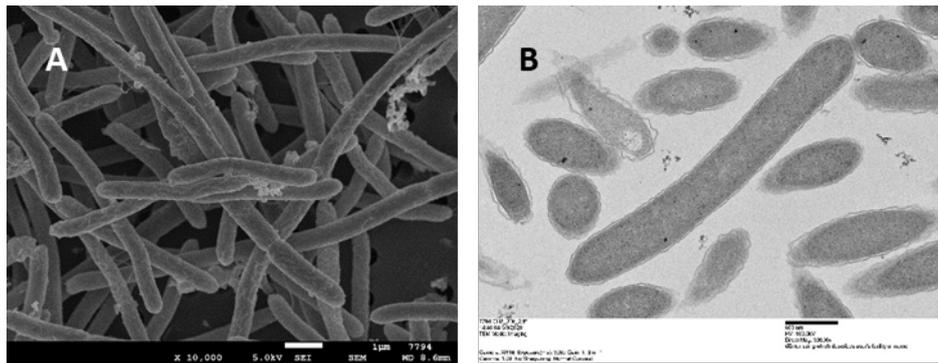


図1 キシロース炭素源培地で培養した *I. thermoxylinivorax* DA-C8 株の細胞の形態

A. *I. thermoxylinivorax* DA-C8 の走査型電子顕微鏡像、白いスケールバーは1 μm。B. *I. thermoxylinivorax* DA-C8 株の薄切片の透過型電子顕微鏡像、黒いスケールバーは0.4 μm。

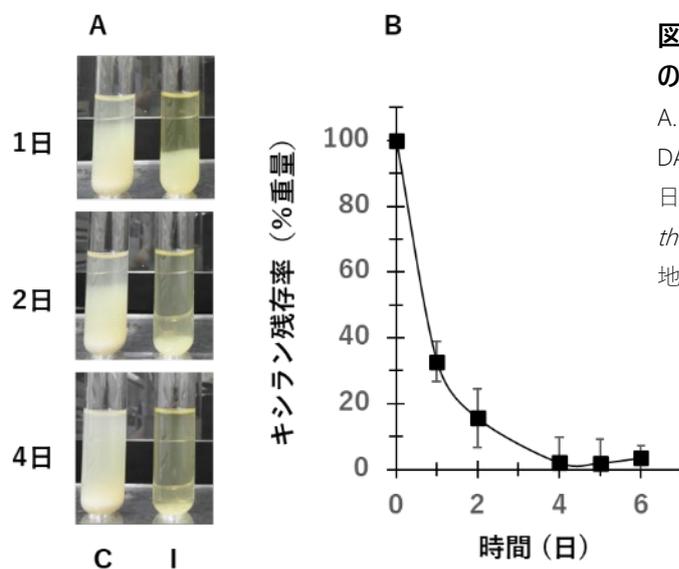


図2 *I. thermoxylinivorax* DA-C8 によるキシランの糖化能

A. 1% キシラン炭素源培地における *I. thermoxylinivorax* DA-C8 のキシラン糖化の様子。A. 菌接種後、1日目、2日目、4日目の様子。Cは未接種、Iは *I. thermoxylinivorax* DA-C8 を接種。B. 1%キシラン炭素源培地における経時的なキシランの残存率を示す。

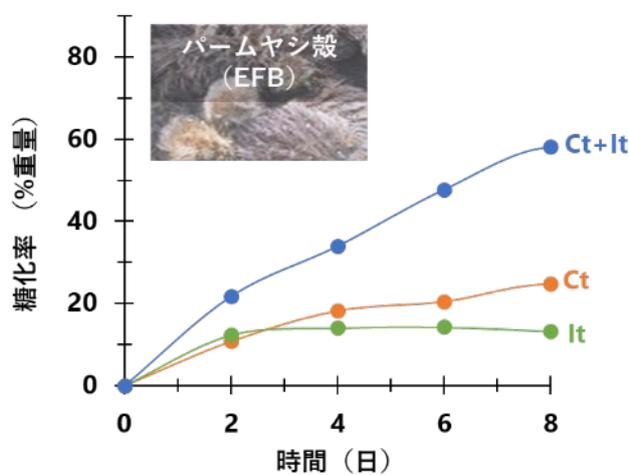


図3 *I. thermoxylinivorax* DA-C8 と *C. thermocellum* の共培養による微生物糖化

1% EFB 繊維を含む培地で微生物糖化を測定。微生物糖化法で利用されるセルロース糖化能が高い *C. thermocellum* 単独 (Ct)、*I. thermoxylinivorax* DA-C8 単独 (It)、*C. thermocellum* と、*I. thermoxylinivorax* DA-C8 との共培養 (Ct+It) における糖化能力の比較。

図は Chhe et al. (2021) © Elsevier B.V. 2021 より転載/改変して作成（転載/改変許諾済み）

## 降雨による滞水はオイルパームの幹上部での遺伝子発現を変動させる

約2年間にわたって時系列に得たオイルパーム成木の幹及び葉の遺伝子発現動態を解析したところ、短期的な大量の降雨時に、幹においてのみ遺伝子発現動態に大きな変動が生じる。この大きな変動は低酸素応答やエチレン応答に関する遺伝子群であり、これらの遺伝子群は滞水によって生じる典型的なストレス応答である。滞水していない幹上部で発現していることから、オイルパームは滞水に脆弱であることが示唆される。

キーワード：オイルパーム、滞水、遺伝子発現、ストレス応答

### 背景・ねらい

パーム油は世界の植物油生産の約36%を占め、最も多い生産量を誇る。しかし、その生産のほとんどが、東南アジアのインドネシアとマレーシアで行われており、生産体制の地理的偏在性は、顕在化する気候変動下において、脆弱であると考えられる。そこで、オイルパーム (*Elaeis guineensis*) が影響を受ける気象要因を明らかにするために、時系列に採取したオイルパーム組織の遺伝子発現量を網羅的に取得し（トランスクリプトーム解析）、気象要因との関係を調べることで、環境に対する生理的な応答を明らかにする。環境要因へのオイルパームの生理応答が明らかになると、オイルパームの気候変動をはじめとする環境変化への脆弱性を指摘でき、持続的なオイルパームプランテーション経営に貢献することができる。

### 成果の内容・特徴

1. インドネシア共和国ランブン州の調査地にて、オイルパームの葉組織及び幹組織から時系列にトランスクリプトーム解析用のサンプルを収集する（図1、2）。約2年間の9回にわたるサンプリング時点（T1～T9）で、T3とT7では、日降水量が80mmを超える降雨があり、滞水状態のサンプルを得る。T3とT7のオイルパーム幹組織から得たサンプルの遺伝子発現プロファイルは他の時点の遺伝子発現プロファイルとは大きく異なる（図3）。各時点の葉組織及び幹組織から得た遺伝子発現プロファイルと日平均気温や積算温度との間には明確な関係はない。
2. オイルパーム幹組織と葉組織の遺伝子発現プロファイルについて、モデル植物であるシロイヌナズナの遺伝子機能との相同性検索をもとに、滞水に関する遺伝子とそれ以外に分け、遺伝子発現パターンが変化した遺伝子の比率を調べる。幹組織では、発現上昇及び発現抑制の両方で滞水に関わる遺伝子が発現変動する比率が、その他の遺伝子群に対して大きくなる。一方で、葉組織ではそのような傾向はない（図4）。

3. シロイヌナズナやオイルパームの遺伝子機能相同性検索の結果、低酸素応答や酸素量の応答に関する遺伝子群で発現量が大きく異なる。また、エチレン応答に関する遺伝子の発現量の変化も見られ、滞水へのストレス応答が見られる（図5）。
4. 本報において、オイルパームの成木が温度変化にはレジリエンスを発揮しているのに対し、短期的な相当量の降雨による滞水環境下においては、幹組織で敏感にストレス応答反応が起こっており、滞水への脆弱性が示唆される。

### 成果の活用面・留意点

1. 滞水が予測される低地や、気候変動下での極端な降雨が予測される地域（東南アジアではラニーニャ発生時に降雨が増加する）など、不適地への開発の抑止が本報によって期待できる。
2. 本報はオイルパーム成木の滞水時の幹組織の遺伝子発現パターンの変化を明らかにしたもので、その際と同化速度の変化や組織の破壊、さらには生産量の低下など、滞水によるオイルパーム生産量の変化や持続性については明らかにしていない。今後、さらに研究、観測を行う必要がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [A2 カーボンサイクル（第5期）]、外部資金 [SATREPS]  
研究実施期間：2021～2023年度  
研究担当者：谷尚樹（林業領域） 荒井隆益、近藤俊明、小杉昭彦（生物資源・利用領域）、Irawati, D., Nugroho, S., Marsoem, N.S.（ガジャマダ大）、Lim, H.（筑波大）  
発表論文等：Lim et al. (2023) *Frontiers in Plant Science* 14: 1213496. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1213496>

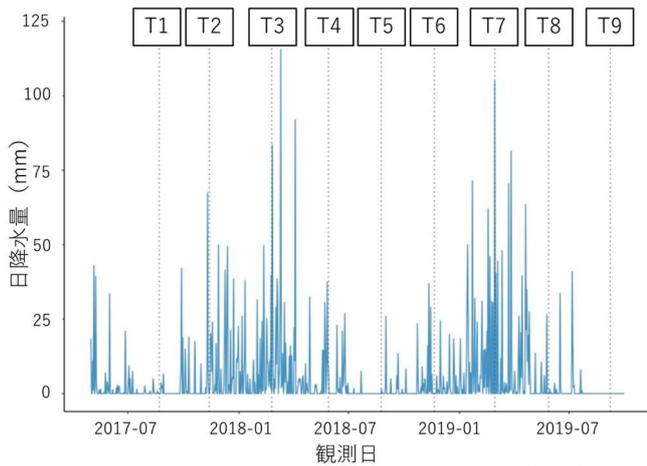


図1 調査地（インドネシア共和国ランブン州）における観測期間の日降水量

T1～T9は現地調査及びトランスクリプトーム解析用のサンプル採取日を表す。

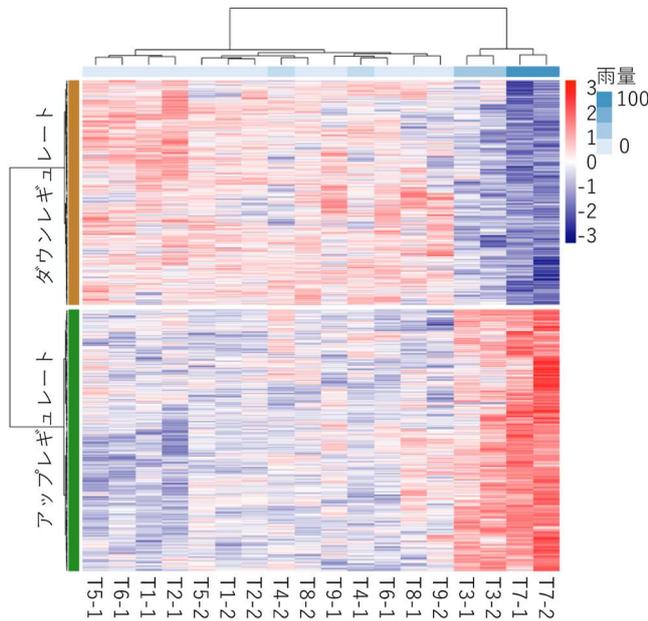


図3 幹の遺伝子発現プロファイルのヒートマップ

サンプリング時の日降水量の大小によってプロファイルを並べた時のヒートマップ。日降水量が大きかったT3とT7で遺伝子発現プロファイルが大きく異なることが分かる。

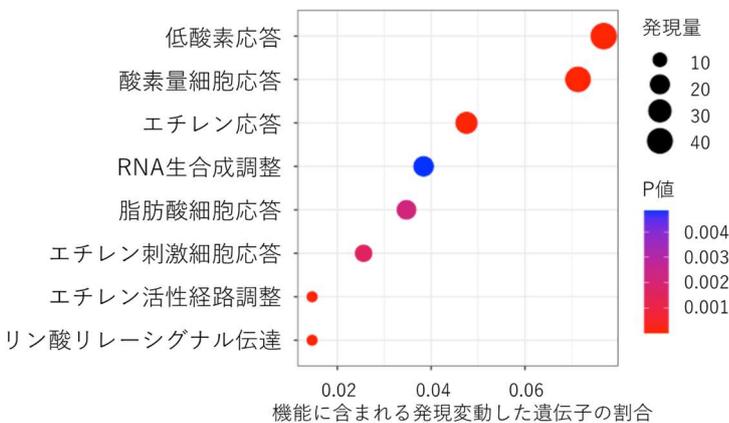


図5 幹において滞水時に発現量が異なった遺伝子の機能

幹において発現量が大きく異なった遺伝子の機能を調べたところ、低酸素応答や酸素量の応答に関する遺伝子群で発現量が大きく異なっている。また、エチレン応答に関する遺伝子の発現量の変化も見られる。



図2 対象としたオイルパーム古木とトランスクリプトーム解析用サンプルの採取

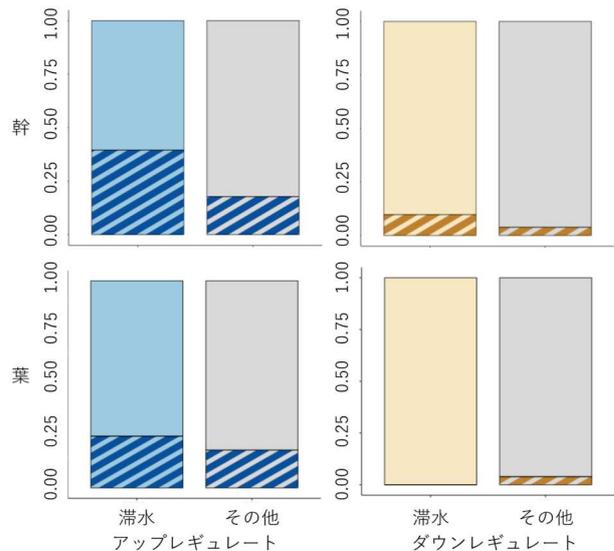


図4 滞水に関する遺伝子群とその他の遺伝子群での滞水時に有意に発現量の異なる遺伝子の割合

滞水時（T3とT7）に発現量が有意に異なる遺伝子の割合（図中の斜線部）を発現上昇（アップレギュレート）と発現抑制（ダウンレギュレート）について調べたところ、幹において滞水に関わる遺伝子群とその他の間で発現量が異なる遺伝子の割合は大きく異なる。しかし、葉では発現量の異なる遺伝子の割合は滞水に関わる遺伝子群とその他の間で大きく異ならない。

図は Lim et al. (2023) © The Author(s) 2023 より転載/改変して作成

## トウモロコシの生物的硝化抑制（BNI）の鍵となる物質を同定

BNI 活性を有するトウモロコシ根分泌物の親水性画分から見出される MBOA は硝化菌の増殖を抑制し、土壌由来の硝酸発生量を減少させる。トウモロコシ根が産生するベンゾキサジノイド類は土壌中で最終的に MBOA に変換されることから、MBOA はトウモロコシの強力な BNI 活性物質である。

キーワード：BNI、トウモロコシ、ベンゾキサジノイド

### 背景・ねらい

近代農業は、工業生産された窒素を多量投入することで増収を図ってきたが、トウモロコシやコムギなどの農地に施肥された窒素肥料の50%以上は、作物に利用されず農地外へと流出している。この窒素流出の大きな原因は、硝化菌による「硝化」であり、温室効果ガス排出や水質汚染など、窒素損失に起因する様々な問題を引き起こしている。本研究では作物が根から物質を分泌し硝化を抑制する現象「生物的硝化抑制(Biological Nitrification Inhibition = BNI)」に着目している。根の分泌物は水への溶けやすさによって、疎水性と親水性に分類される。水に溶けにくい疎水性 BNI 物質（令和3年度国際農林水産業研究成果情報 A05「トウモロコシ根の生物的硝化抑制(BNI)物質の発見」）は根圏で効果的である一方、親水性物質は水に溶けることで土壌中の広い範囲に分布し、硝化抑制の効果をより強く発揮する。トウモロコシ根由来親水性 BNI 物質の同定を行うことで、地球に優しく高効率な BNI を活用したトウモロコシ生産システムの確立に繋げる。

### 成果の内容・特徴

1. トウモロコシを30日間水耕栽培した後、根の親水性分泌物を採取し、BNI 活性を持つ親水性画分を得る。BNI 活性の強さを指標にし、高速液体クロマトグラフィー(HPLC)による分離・精製により、BNI 物質を単離できる。
2. 同定できる MBOA の BNI 活性は ED50= 0.76  $\mu$ M（活性を50%抑制する実効濃度）であり、トウモロコシ根分泌物としてこれまでに報告された BNI 物質よりも強力な作用を持ち、全 BNI 活性に最も大きく貢献できる（図1）。
3. MBOA は硝化菌の硝化と増殖を強く抑制する（図2）。
4. 土壌培養試験において、MBOA の硝化抑制能は土壌添加後（スタート）から4日間確認できたが、培養5日目以降その硝化抑制能は減少する。土壌培養試験中、MBOA の濃度は時間依存的に減少し5日目には検出されないことを見出せる。MBOA の硝化抑制能は土壌微生物による MBOA の分解に伴い減少すること

が見出せる（図3）。

5. トウモロコシの BNI は、3種の BNI 物質（疎水性：ゼアノンと HDMBOA、親水性：MBOA）によって発現する。多量に産生される疎水性 BNI 物質 2-hydroxy-4,7-dimethoxy-1,4-benzoxazin-3-one (HDMBOA) は土壌中でより強力な BNI 活性を有する MBOA に変換される。この変換は、分解しやすい化学構造を有するベンゾキサジノイド類の HDMBOA がより安定した構造の MBOA に迅速に自動変換される化学反応である。さらに根内部に蓄積したベンゾキサジノイド類の HDMBOA- $\beta$ -グルコシド（HDMBOA にグルコースが結合した化学構造）も生物（植物・微生物）の糖分解酵素によって高い BNI 活性を持つ HDMBOA に変換された後、MBOA に化学的に自動変換される。以上のことから、MBOA はトウモロコシの BNI の主要な役割を持つ（図4）。

### 成果の活用面・留意点

1. 土壌中で MBOA 自身も分解される一方で、トウモロコシ根から新たに供給されることから安定的な BNI の発現が期待できる。
2. 世界で栽培されるトウモロコシの BNI 活性は BNI 物質を指標に強化することが期待できる。
3. 品種間における BNI 物質量の比較や BNI 物質の分泌メカニズムの解明、圃場試験などを実施する必要がある。

### その他

予算区分：交付金 [A3 BNI システム（第5期）]

研究期間：2021～2023年度

研究担当者：大高潤之介、吉橋忠（生物資源・利用領域）・グントゥール・ヴェンカタ・スバラオ、ミンリー・ジャン（生産環境・畜産領域）、小野裕嗣（農研機構・高度分析研究センター）

発表論文等：Otaka et al. (2023) *Plant and Soil* 489: 341–359: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06021-7>

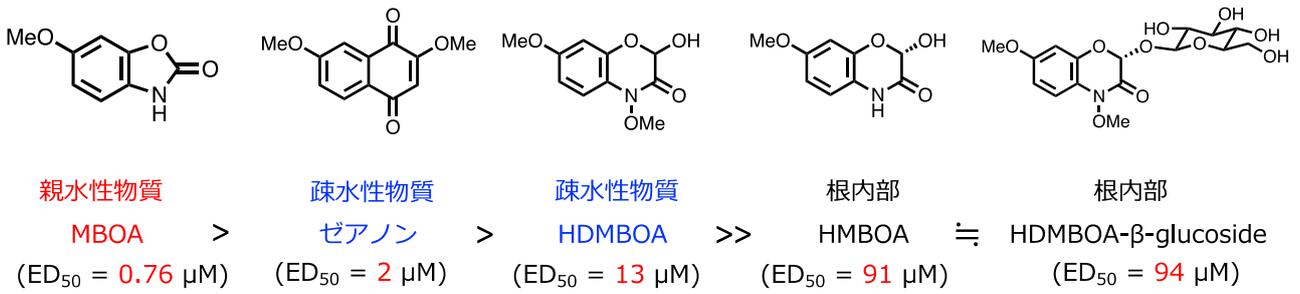


図1 トウモロコシの根から同定した BNI 物質の化学構造と活性の強さ

各 BNI 物質名の括弧の中は硝化菌に対する BNI 活性の強さを示す。数値が小さいほど活性が強い。

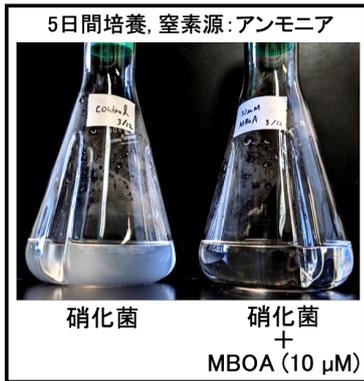


図2 MBOAの硝化菌の生育に与える影響

増殖した硝化菌によって白濁した液体培地（左）と、MBOA 存在下で強力に増殖阻害された硝化菌（右）。

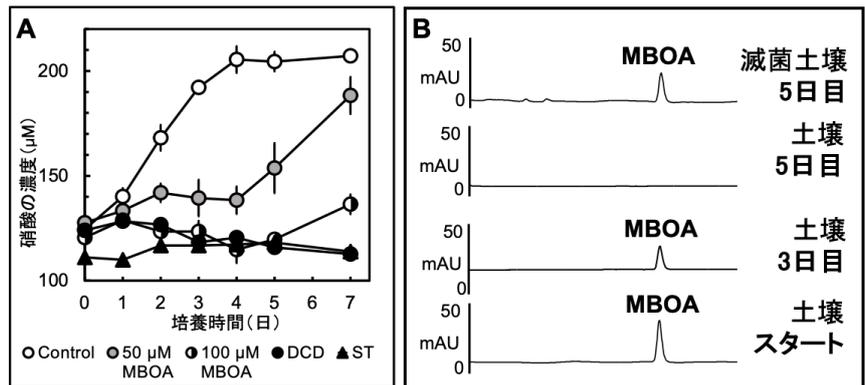


図3 土壌培養試験における MBOA の硝化抑制能と安定性

MBOA 添加条件下で土壌を培養し、硝酸と MBOA の濃度を経時的に測定した。0 日目はサンプルを添加してから 1 時間後の結果である。(A) Control = MBOA を加えていない条件, DCD = 化学硝化抑制剤・ジシアンジアミドを添加した条件, ST = 滅菌土壌を培養した条件。(B) 土壌培養液中の MBOA の濃度を HPLC により分析した結果、MBOA の存在を示すピーク値は培養期間に依存して減少したが、滅菌土壌では確認できなかった。

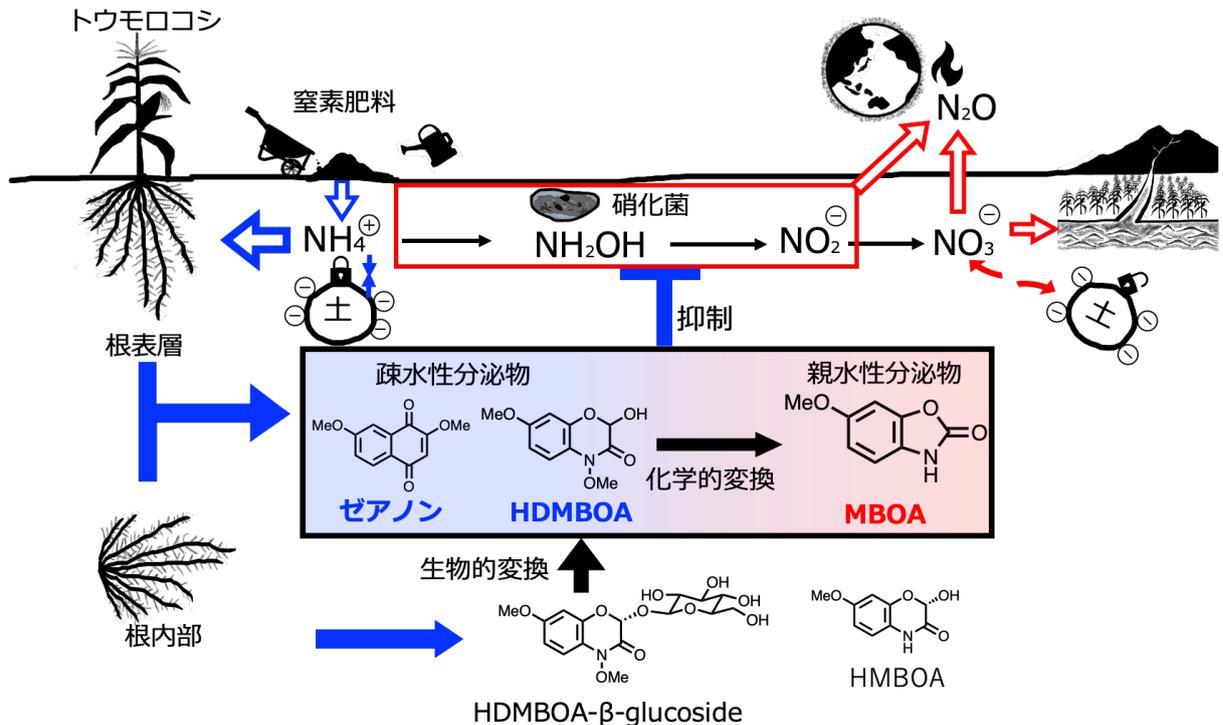


図4 トウモロコシの BNI メカニズム

鍵となる MBOA を含める 3 種の BNI 物質によってトウモロコシの BNI は発現する。

図表は Otaka et al. (2023) © The Author(s) 2023 より転載/改変して作成

## 実生のゲノム情報からフタバガキの幹直径と樹高を予測するモデルの開発

東南アジア熱帯雨林の主要構成樹種であるフタバガキ科の成長には多数の遺伝子が複雑に関与している。既存の次代検定林をゲノム予測モデル開発のためのトレーニング集団とし、ゲノムワイド連関解析と線型・非線形のモデル開発用アルゴリズムを組み合わせたワークフローを適用することにより、実生のゲノム情報から幹の直径成長と樹高成長における複雑な遺伝様式を説明する最良のゲノム選抜モデルが得られる。

キーワード：フタバガキ科、ゲノム選抜モデル、ゲノムワイド連関解析、成長、炭素蓄積

### 背景・ねらい

近年、ゲノム解析技術の急速な発展に伴い、野生種に近い木本植物においても比較的安価にゲノム情報の収集が可能となっている。一方で、個体サイズが大きく長寿命である木本植物においては、優良個体を交配した後、次世代のパフォーマンスを評価（次代検定）するために広大な土地と成長に係る時間が必要であり、優良個体の選抜を律速する要因である。そこで、ゲノム情報を活用し、着目する表現型を予測する手法に注目が集まっている。すなわち、交配から得られた実生のゲノム情報を活用して将来の表現型を予測できれば、これまでの律速要因を解決することが可能となる。そのためには、対象とする表現型とゲノム情報が既知の林分を用いて、ゲノム情報から表現型を予測するモデル（ゲノム選抜モデル）が必要である。本研究では東南アジア熱帯林において今後集約的林業で植栽が期待されるフタバガキ科樹種の一つである *Shorea macrophylla* の成長に関するゲノム選抜モデルを作成する。

### 成果の内容・特徴

1. 比較的環境変化の少ない検定林をゲノム選抜モデル作成のためのトレーニング集団として設定し、ゲノム情報の収集、目的とする表現型の計測、環境偏差による空間構造補正をおこなった上で、重要な遺伝マーカーの検出のためのゲノムワイド連関解析、その結果を用いたゲノム選抜モデル作成のワークフローを確立する（図1）。
2. ゲノムワイド連関解析の結果をもとに連関度の高いマーカーを選抜し、線形モデル（6アルゴリズム）と非線形モデル（6アルゴリズム）の中から、最適なアルゴリズムを使用すると、使用に耐える予測精度が得られる（表1）。
3. 植栽7年目の幹直径成長について線形モデルを用いた7手法と非線形モデルを用いた7手法でランダムに100モデルを作成した時の予測精度の中間値を算出する。直径成長は一次成長と二次成長の複合的な結果であるため、関連遺伝子数が多く、そのため、多くの遺伝マーカーと遺伝子間の相互作用を説明できる非線

形モデルを用いた方が高い予測精度が得られる。（図2）。

4. 樹高は一次成長の結果であるため、関連する遺伝子数が少ないと考えられる。GWASによって関連遺伝子数を絞り込んだ方が、予測精度の高いゲノム選抜モデルが得られる。（図3）。

### 成果の活用面・留意点

1. 本研究において開発したR言語及びPythonで記述したスクリプトを公開した。これにより多くの手法を用いたゲノム選抜モデルの作成への応用が期待できる。
2. 本成果を基にすることで、次代検定を行うことなく、トレーニング集団から種子を採取し、ゲノム情報を元にその実生を選抜することで、成長に関する育種効果が期待できる。
3. 本モデルは遺伝的組成が異なる集団には適応できない。したがってトレーニング集団が、遺伝的組成の近い集団からの実生を選抜に使用する必要がある。また、同一アルゴリズムでも予測精度にばらつきがあることから、アンサンブル学習を行うなど、予測精度に留意する必要がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [A4 環境適応型林業]、外部資金 [SATREPS]

研究実施期間：2021～2023年度

研究担当者：谷尚樹（林業領域）、Na'iem, M., Widiyatno, Indrioko, S., Sawitri（ガジャマダ大）、阿久津春人、津村義彦（筑波大）

発表論文等：Akutsu et al. (2023) *Frontiers in Plant Science* 14:1241908. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1241908>

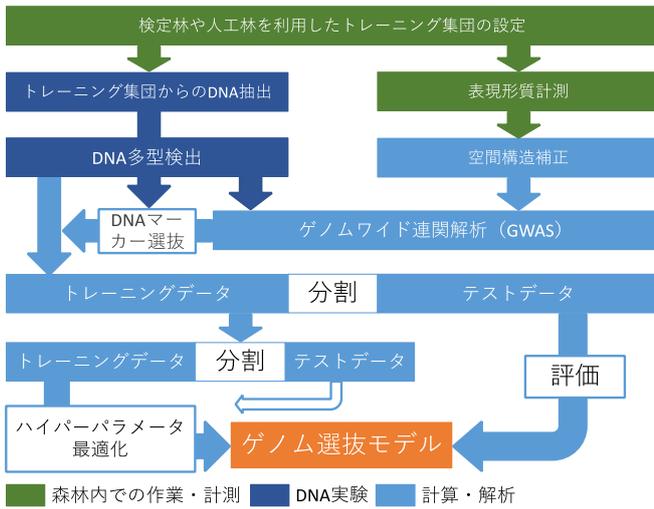


図 1 ゲノム選抜モデルを作成するためのワークフロー

水色はコンピュータ上での解析のコンピュータスクリプトを示し、公開した。

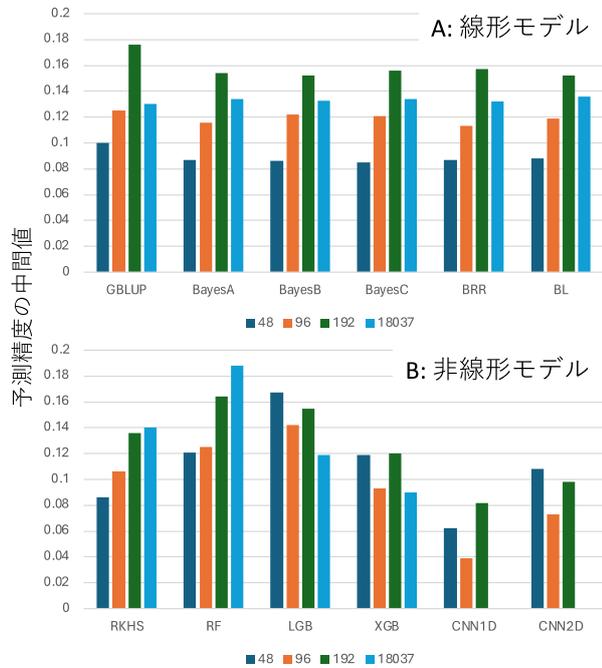


図 2 植栽 7 年目の幹直径成長のゲノム選抜モデルの予測精度の中間値

ゲノムワイド連関解析によって、幹直径成長に関連度の高い DNA マーカーを 48 個、96 個、192 個選抜し（18037 個は全 DNA マーカー）、トレーニングとテストデータのペアをランダムに 10 個作成した後、それぞれのペアについて独立に 10 回計算を試行し、合計で 100 回の計算を行い、得られた予測精度の中間値を得た。A の GBLUP、BayesA、BayesB、BayesC、BRR、BL は線形モデルを用いたゲノム選抜モデルのアルゴリズムを表す。B の RKHS、RF、LGB、XGB、CNN1D、CNN2D は主に機械学習を用いた非線形のゲノム選抜モデルの手法を表す。計算負荷により CNN1D と CNN2d では全マーカーを用いたモデル作成は行っていない。

表 1 幹直径成長及び樹高で得られたゲノム選抜モデルの最大予測精度

形質	マーカー数	最大予測精度	アルゴリズム
D7	48	0.279	BRR
	96	0.342	CNN1D
	192	0.291	CNN1D
	18037	0.440	XGB
H7	48	0.343	XGB
	96	0.427	BayesB
	192	0.354	LGB
	18037	0.297	LGB

D7 は植栽 7 年目の幹直径成長、H7 は植栽 7 年目の樹高を表す。マーカー数はゲノムワイド連関解析で得られた結果をもとに対象形質に関連度の高い準に 48、96、192 個のマーカーを選抜し（18037 個は全マーカー）、得られたデータセットを用いて、10 トレーニングデータを 10 回試行した（合計 100 試行）際の最大の予測精度とその値を算出したアルゴリズムを示す。

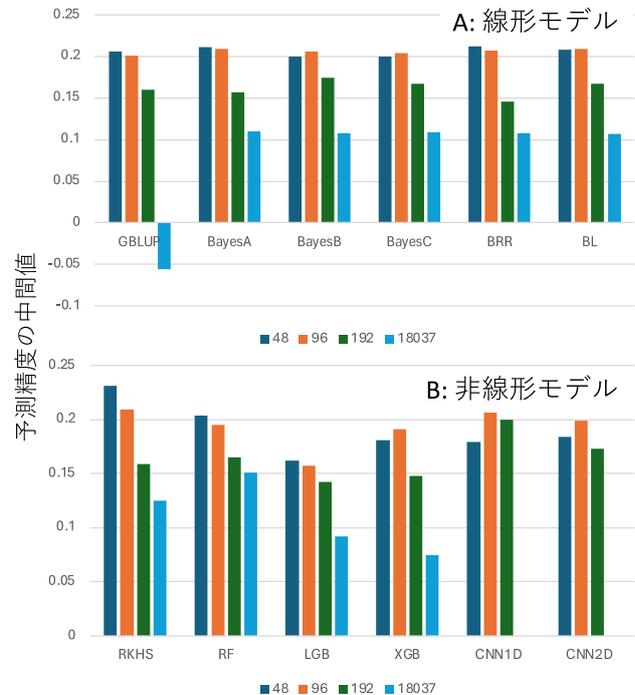


図 3 植栽 7 年目の樹高のゲノム選抜モデルの予測精度の中間値

ゲノムワイド連関解析によって、樹高に関連度の高い DNA マーカーを 48 個、96 個、192 個選抜し（18037 個は全 DNA マーカー）、トレーニングとテストデータのペアをランダムに 10 個作成した後、それぞれのペアについて独立に 10 回計算を試行し、合計で 100 回の計算を行い、得られた予測精度の中間値を得た。A と B のゲノム選抜モデル作成手法については図 2 と同様である。

図表は Akutsu et al. (2023) © The Author(s) 2023 より転載/改変して作成

## 熱帯林樹木テンバガサラノキとセラヤサラノキの種間雑種の干ばつへの強靱性

東南アジアの重要な木材資源であるフタバガキ科のテンバガサラノキは成長が早く植林に適しているが、乾燥耐性が低い。一方、近縁種のセラヤサラノキは成長が遅く収穫まで時間がかかるが、乾燥した立地でも生育する。両者の種間雑種は、葉の厚さや光合成能力、乾燥ストレス耐性等がテンバガサラノキとセラヤサラノキの中間の特性を有しており、干ばつなどの気候変動に対してより強靱な品種作出に利用できる。

キーワード：乾燥耐性、気候変動、雑種、フタバガキ科樹木、熱帯造林

### 背景・ねらい

東南アジアの熱帯雨林地域は、気候変動により干ばつの頻度や強度が高まると予測され、乾燥耐性の低い樹木の枯死や生育不良が危惧されている。この地域の森林で優占するフタバガキ科樹木は、木材資源として重要である。なかでもテンバガサラノキ（*Shorea leprosula*, 図1）は成長速度が速いため植林に適しているが、乾燥耐性が低い弱点がある。一方、同属のセラヤサラノキ（*S. curtisii*）は成長が遅く収穫まで時間がかかるが、乾燥した尾根でも生育できる。

種間の雑種は両親種の様々な特性を組み合わせることができるため、特に作物などで優良な品種の作出に利用される。しかし、フタバガキ科樹木では種間雑種の特性は不明である。本研究ではテンバガサラノキとセラヤサラノキの種間雑種の苗木について、葉の形態や光合成能力、人工的な乾燥ストレス下での生理特性を明らかにし、雑種を用いた気候変動に強靱な品種作出の可能性について検討する。

### 成果の内容・特徴

1. 両親種と雑種で、乾燥耐性と光合成能力に関係する葉の形態を比較する。テンバガサラノキは最も薄い葉を持つが、光合成を活発に行う柵状組織の割合は最も高い。一方、セラヤサラノキは葉が厚く、葉を乾燥から守るクチクラや表皮も厚いが、柵状組織の割合は低い。雑種は葉の厚さが中庸で、柵状組織や表皮の割合も両親種の間のかほとんど変わらない（図2）。
2. テンバガサラノキの光合成能力は、セラヤサラノキより高く、速い成長速度と一致する。雑種は両親種の中間で、セラヤサラノキより成長が早い可能性が高い（表1）。
3. 乾燥ストレスにより枝が通水機能を失うパターンから、セラヤサラノキや雑種の方がテンバガサラノキより強い乾燥に耐えることができる（図3）。
4. かん水停止により人工的に土壌を乾燥させて、葉の

生理機能の変化を調べる。葉の浸透ポテンシャルはテンバガサラノキに比べ、セラヤサラノキと雑種で低く、葉の浸透調節機能が高い。葉が乾燥でしおれる限界値（膨圧喪失時のポテンシャル）から乾燥耐性を評価すると、テンバガサラノキは乾燥により葉がしおれやすいが、雑種やセラヤサラノキではしおれにくく乾燥耐性が高い（表1）。

### 成果の活用面・留意点

1. 雑種はテンバガサラノキより葉の形態が乾燥に頑強で、葉や枝の生理的な乾燥耐性も優れる。このことから雑種は、乾燥耐性が高い品種作出への利用が期待できる。干ばつなどの気候変動に強靱な品種が作出できれば、人工林の気候変動適応策に貢献する。
2. 雑種や雑種由来の品種の植林についてはいくつかの留意点がある。例えば、遺伝子資源の保全を目的とした天然林やその隣接地に新しい品種を植栽する場合には、移出や近縁種間での意図しない交雑が生じて純粋な種の遺伝子汚染が起こる可能性がある。そのため、雑種や雑種由来の品種と近縁種との間に稔性を持つ種子ができるのかなどの確認を行う必要がある。

### その他

予算区分：交付金 [A4 環境適応型林業（第5期）]、外部資金 [科研費 20K06153]  
研究実施期間：2021～2023 年度  
研究担当者：田中憲蔵（林業領域）、市栄智明、則近由貴（高知大）、上谷浩一（愛媛大）、井上裕太（森林総研）、Ngo, K.M., Lum, S.K.Y.（南洋理工大）  
発表論文等：Kenzo T, Ichie T, Norichika Y, Kamiya K, Inoue Y, Ngo KM, Lum SKY. (2023) Drought tolerance in dipterocarp species improved through interspecific hybridization in a tropical rainforest. *Forest Ecology and Management* 548: 121388 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121388>



図1 テンバガサラノキとセラヤサラノキ、両種の種間雑種の花と葉

テンバガサラノキの花弁は閉じて細くねじれるがセラヤサラノキの花弁は開く。雑種の花は開くが花弁がねじれ両親種の特徴を受け継いでいる。

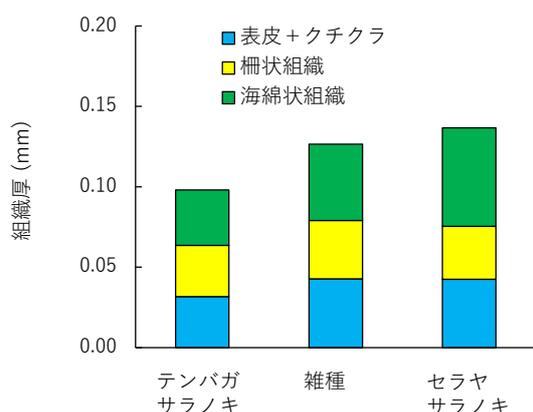


図2 葉の内部組織の厚さ

表皮とクチクラが厚いほど水分蒸発を抑えることができるため乾燥に強く、柵状組織が厚いほど光合成に有利になる。

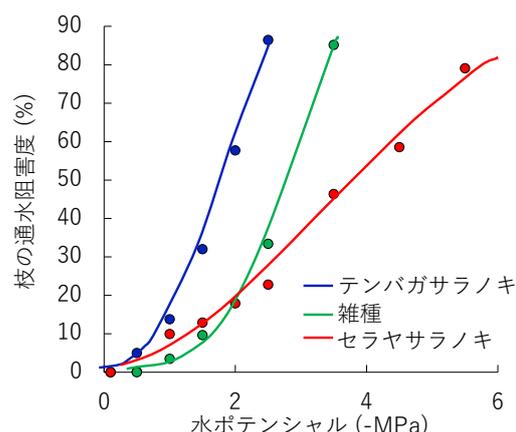


図3 乾燥ストレスに対する枝の通水脆弱性曲線

水ポテンシャルの絶対値が大きいほど乾燥ストレスが大きく、枝がダメージを受け通水機能が阻害される。テンバガサラノキは弱い乾燥ストレスでも通水阻害度が高くなる。

表1 葉の飽和光合成速度、乾燥ストレス下での葉の浸透ポテンシャルと膨圧喪失時のポテンシャル

	飽和光合成速度 ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	浸透ポテンシャル (MPa)	膨圧喪失時のポテンシャル (MPa)
テンバガサラノキ	3.16a	-1.18a	-1.33a
雑種	2.44ab	-1.40b	-1.53b
セラヤサラノキ	2.09b	-1.54b	-1.72c

飽和光合成速度が高いほど光合成能力が高い。浸透ポテンシャルが低いほうが葉の浸透調節機能が高く、膨圧喪失時の水ポテンシャルが低いほど、葉がしおれに強く乾燥耐性が高いことを意味する。異なるアルファベットは統計的に有意差を示す。

図表は Kenzo et al. (2023) © 2023 Elsevier B.V. より転載/改変して作成（転載/改変許諾済み）

## 炭化物の施用深度の違いは窒素溶脱量と水収支を左右する

炭化物の施用量が同量であっても施用深度が異なると、硝酸態窒素溶脱量と水収支に差が生じる。表層および作土層全体の土壤に炭化物を施用すると、硝酸態窒素溶脱量が減少する傾向が認められる。一方、下層に施用する場合、硝酸態窒素溶脱の軽減効果は認められない。炭化物を適切な深度に施用することで、環境負荷の軽減が期待できる。

キーワード：バガス炭、硝酸態窒素、パイプ試験、窒素溶脱、水収支

### 背景・ねらい

ハーバー・ボッシュ法の発明により大量生産が可能となった窒素肥料は食料増産を支える重要な農業資材であるが、化学肥料の大量投入による過剰な窒素溶脱が水圏の環境負荷等の問題を引き起している。特に地下水を飲料用水源としている開発途上地域や地下ダムの活用が広がっている島嶼地域では、地下水の硝酸汚染や生態系への影響などが懸念されており、窒素溶脱の軽減は喫緊の課題となっている。

農地への炭化物施用は炭素隔離に有効であるだけでなく、窒素溶脱を軽減する手法としても知られており、最適な施用量に関する研究がこれまでに多く行われている。しかし、最適な施用深度に関する研究は極めて少ない。

本研究では、土壤を充填した室内でのパイプ試験において、炭化物の施用深度の違いが窒素溶脱量に与える影響を明らかにする。

### 成果の内容・特徴

1. 施用量を  $10 \text{ t ha}^{-1}$  としてバガス炭を表層（深さ 0–5 cm）、作土層（深さ 0–30 cm）、下層（深さ 25–30 cm）の土壤に混合する。各炭化物層のバガス炭重量比は表層施用と下層施用で 1.57%、作土層施用で 0.26% である。定期的に表面灌漑を行い、窒素肥料として粉体で硫酸アンモニウムを施用する。試験期間中のパイプからの排水量や硝酸態窒素溶脱量をバガス炭無施用条件と比較する（図 1）。
2. パイプ下端からの排水量および硝酸態窒素溶脱量は、各条件で異なる（図 2）。表層施用により硝酸態窒素溶脱量は減少する傾向にある。作土層に炭化物を施用することにより排水量と硝酸態溶脱量は有意に減少する。下層施用では排水量および硝酸態窒素溶脱量のいずれにも有意な変化は認められない。
3. 炭化物施用深度ごとの試験期間中の水収支の変化傾向を、灌水量、排水量およびパイプ内の土壤水分状態から求める（表 1）。無施用に比べ、表層施

用では蒸発量が減少する傾向があるのに対し、作土層施用では蒸発量が増加する傾向が見られる。

4. 炭化物を表層および作土層の土壤に施用する場合、硝酸態窒素溶脱量が軽減する傾向にある。これは炭化物施用深度の差異が引き起こす土壤水分挙動変化に起因するものと推定される。

### 成果の活用面・留意点

1. 炭化物を適切な深度に施用することで、硝酸態窒素の溶脱軽減が期待できる。また溶脱軽減に伴い、化学肥料使用量削減にも貢献できる可能性がある。
2. 本試験の使用土壤・炭化物は国頭マージ、バガス炭であり、他の土壤・炭化物によっては、異なる結果になる可能性がある。
3. 炭化物を表層、作土層に施用することで生じる硝酸態窒素溶脱量の変化のメカニズムについては、今後シミュレーションなどにより詳しく検証する必要がある。また、作物がある場合の炭化物の施用深度の影響評価も今後必要である。

### その他

予算区分：交付金プロ [A5 熱帯島嶼環境保全（第5期）]  
研究実施期間：2021 年度  
研究担当者：濱田耕佑、神田隆志（熱帯・島嶼研究拠点）、中村智史（生産環境・畜産領域）  
発表論文等：Hamada K, Nakamura S, Kanda T, Takahashi M. (2023) Effects of biochar application depth on nitrate leaching and soil water conditions. *Environmental Technology*.  
<https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2283403>

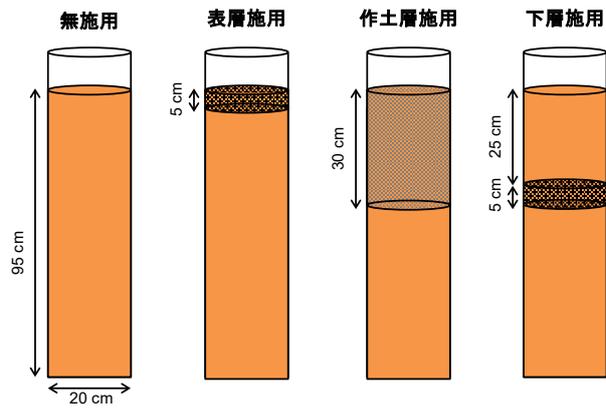


図1 パイプ試験の様子

2021年8-11月に熱帯・島嶼研究拠点のガラス室内で4条件（無施用、表層施用、作土層施用、下層施用）の試験を5反復で実施。土壌の乾燥密度は1.25 g cm<sup>-3</sup>。

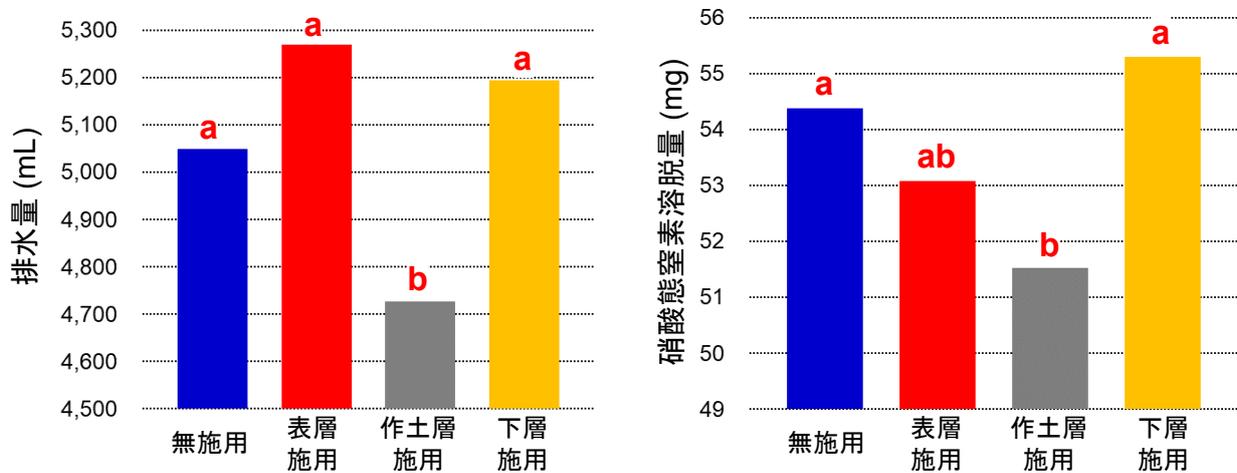


図2 パイプ下端からの排水量（左）および硝酸態窒素溶脱量（右）

各グラフのアルファベットは有意差(p<0.05)を示す。

表1 試験期間中の各条件の水収支

	無施用	表層施用	作土層施用	下層施用
灌水量 (mL)	14,850			
蒸発量 (mL)	8,960	8,754	9,389	9,149
パイプ内水分量 (mL)	6,977	7,175	6,860	6,964
排水量 (mL)	5,049 <sup>a</sup>	5,269 <sup>a</sup>	4,726 <sup>b</sup>	5,194 <sup>a</sup>

灌水量は全てのパイプで同量であり、排水量は最大最小を除いた3反復分の平均値を示す。パイプ内水分量はパイプ内4深度（10、20、35および80 cm）に設置した土壌水分センサー(n=2)から推定。蒸発量は灌水量からパイプ内水分量および排水量を差し引くことで算出。排水量のアルファベットは有意差(p<0.05)を示す。

## 陸域から沿岸域へ流入する溶存有機物および鉄の変動要因を機械学習で解明

熱帯島嶼の河川を対象に定期的に水質調査を行い、その結果について機械学習手法を用いて解析すると、河川水中の溶存有機物量は季節変動を示すとともに、流域の土地利用や土壌特性の影響を強く受けること、特に低湿地土壌から供給される腐植物質様成分の寄与が大きいことが分かる。また、腐植物質様成分の量が多いほど、植物プランクトンや海藻類等の必須栄養素である鉄の濃度が増加することが分かる。

キーワード：機械学習、鉄、熱帯島嶼、溶存有機物、流域

### 背景・ねらい

熱帯島嶼の周辺には、サンゴ礁など生物多様性が高く、観光・漁業資源としても重要な沿岸生態系が発達しているが、それらは陸域からの物質負荷の影響を強く受ける。たとえば有機物は、紫外線の吸収や微生物へのエネルギーおよび養分の供給など、海洋生態系の維持に重要であるが、その過剰な流入は光の透過性を低下させ、植物プランクトンや海藻類による光合成を阻害する。また、鉄は海藻類の生育に重要な成分の一つであるほか、サンゴの高温ストレス耐性の維持に寄与していることも報告されている。一方、溶存態の有機物(DOM)は鉄と結合することにより、元来水に溶けにくい鉄の輸送・供給に大きく寄与している。

そこで、陸域から河川を介して流入する DOM の量や化学特性（分解性や鉄との結合能力など）ならびにそれらの変動要因について明らかにするために、熱帯島嶼の一つである石垣島（沖縄県）内の主要な 6 つの河川を対象に、定期的に水質調査を実施する。そして、DOM の濃度および主な構成成分に及ぼす季節および流域特性（土地利用や土壌特性など）の影響を解析する。これらの水質や流域特性のデータはしばしば非正規分布を示し、また両者の関係が非線形である場合も多いことから、解析にはこれらを含むデータセットにもそのまま適用でき、さらに各説明変数の重要度も評価できる、機械学習手法の一種であるランダムフォレスト(RF)を用いる。さらに、DOMの成分組成が河川水中の溶存鉄(DFe)濃度に及ぼす影響についても同様に解析する。

### 成果の内容・特徴

1. 水質調査は、計 22 地点において 2 ヶ月に 1 回の頻度で 2 年間実施する。DOM の全濃度として溶存有機態炭素(DOC)濃度を定量する。また、3 次元蛍光スペクトル(EEM)の測定データについて多変量解析の一種である parallel factor analysis (PARAFAC)を行うことにより、DOM の主要構成成分を同定する。
2. DOC および EEM-PARAFAC の各成分について、RF を用いて流域特性（各土地利用および土壌タイプの面積割合、人口密度）および水温を説明変数とするモ

デルを作成する。DOC および 3 つの腐植物質様成分(C1, C2, C3)は、予測値の実測値に対する適合度を示す Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)が学習データに対して 0.88 ~ 0.91、検証データに対して 0.71 ~ 0.77 となり、モデルの予測精度は高いと評価できる。

3. 各説明変数の重要度から、DOC、各腐植物質様成分のいずれに対しても、水温および強グライ土（排水不良の低湿地土壌）の影響が最も大きいことが分かる（表 1）。さらに、partial dependence plot（図 1）から、水温が 26°C 以上で DOM の量が大きく増加すること、ならびに強グライ土の面積割合が 12%以上で腐植物質様成分の量が特に大きく、同土壌から供給されるこれらの有機物の寄与が大きいことが分かる。
4. DFe 濃度について、EEM-PARAFAC の各成分および鉄の化学形態や DOM との結合に関連する水質因子を説明変数とする RF モデルを作成する。NSE が学習データに対して 0.92、検証データに対して 0.62 と高いことから、DFe 濃度は DOM の成分組成や関連する水質因子の影響を強く受けることが分かる。中でも、腐植物質様成分(C1)の重要度が大きく、これらの量が多いほど DFe 濃度が増加する（図 2）。

### 成果の活用面・留意点

1. 本成果は、令和 4 年度国際農林水産業研究成果情報「河川水中の栄養塩類濃度は土地利用などの流域特性から機械学習で予測できる」と併せて、陸域からの物質負荷の実態把握に活用できる。
2. 説明変数とした土地利用と土壌タイプとの間に相互依存関係が存在する場合があります。変数の重要度を評価する際はその影響について検討する必要がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [A5 熱帯島嶼環境保全（第 5 期）、A3 アジア・島嶼資源管理（第 4 期）]

研究実施期間：2020～2023 年度

研究担当者：菊地哲郎（生産環境・畜産領域）、安西俊彦（熱帯・島嶼研究拠点）

発表論文等：Kikuchi et al. (2023) *Sci. Total Environ.* 904: 166892. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166892>

表1 溶存有機態炭素(DOC)濃度および腐植物質様成分(C1, C2, C3)の各ランダムフォレスト(RF)モデルにおける各説明変数の重要度（当該変数の値をランダムに入れ替えたときの予測値の平均平方誤差の増加率(%)）

説明変数	DOC	C1	C2	C3
水温	16.1	20.8	21.3	17.5
農地 <sup>a</sup>	10.8	9.1	11.2	10.0
牧草地	11.2	8.8	11.5	9.9
水田	9.7	7.5	9.3	8.1
森林	14.1	11.1	13.2	11.9
畜舎	7.0	8.0	7.2	8.2
赤色土	11.9	11.1	11.3	10.9
適潤性黄色土 <sup>b</sup>	12.3	9.9	12.4	10.2
その他黄色土	12.7	8.9	8.3	8.6
細粒暗赤色土	8.1	7.0	6.3	6.1
その他暗赤色土	7.7	6.7	6.2	5.8
強グライ土	16.1	22.2	16.8	21.4
人口密度	11.7	9.6	8.9	8.6

値が大きいほど重要度が大きいと判断される。15%より大きい場合白太字で表示。  
 C1：陸域由来有機物の光分解により生成  
 C2：有機物の微生物分解により生成  
 C3：特にリグニンの分解産物に類似  
<sup>a</sup> 水田を除く。<sup>b</sup> 主に山林に分布

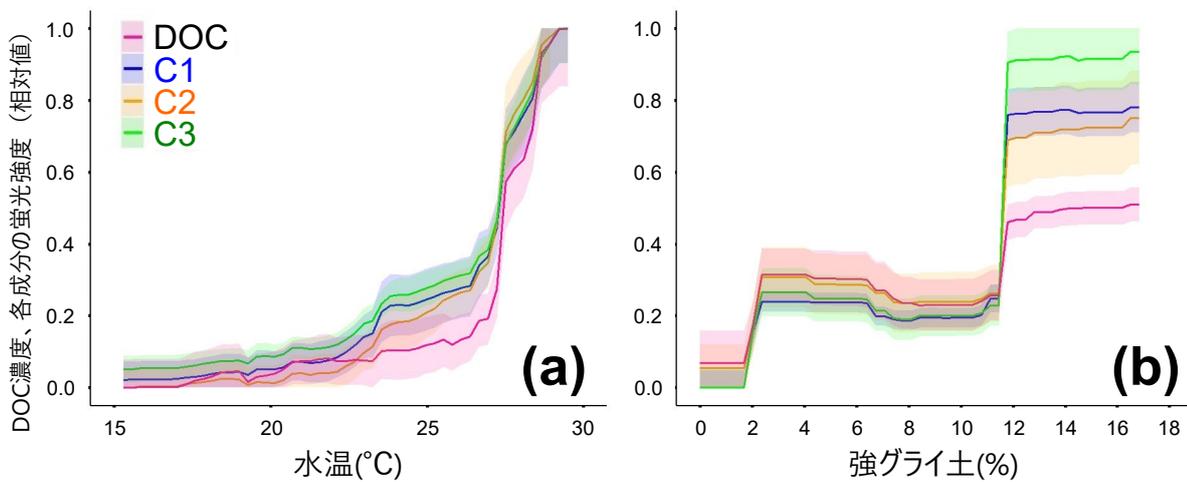


図1 水温(a)および強グライ土の面積割合(b)に対する DOC 濃度ならびに腐植物質様成分(C1, C2, C3)の partial dependence plot (PDP)

全データセットをランダムに5等分し、そのうちの4つを統合したものを学習データとする。計5通りの組み合わせによる学習データのそれぞれについてRFモデルを作成する。この操作を3回繰り返す。実線は、得られた計15個のRFモデルによる計算値の平均値、網掛けは同標準偏差。比較のため、縦軸は平均値の最小値～最大値の範囲（a, b 共通）を0～1で標準化している。

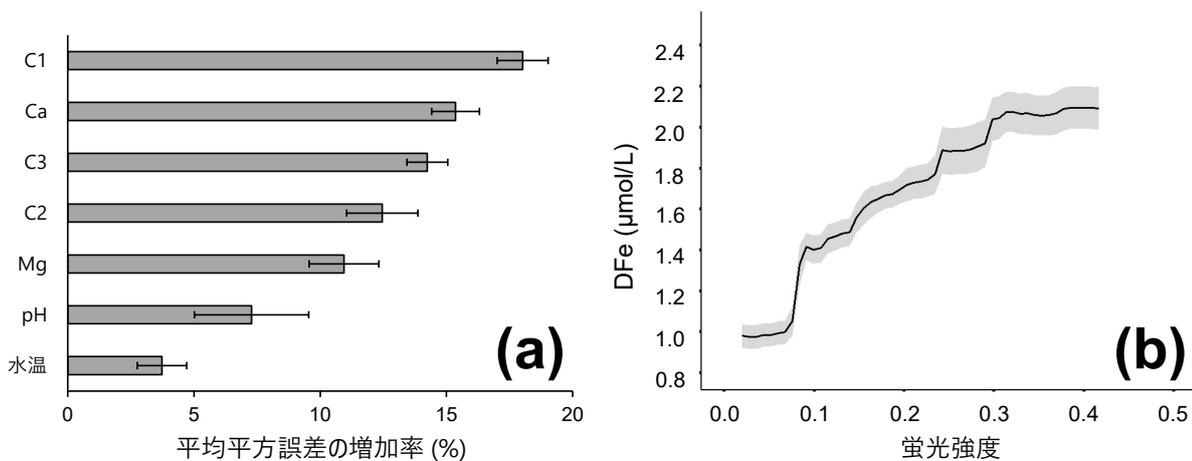


図2 (a) 溶存鉄(DFe)濃度のRFモデルにおける各説明変数の重要度。(b) 腐植物質様成分C1に対するDFe濃度のPDP

(a) 計15個のRFモデルの平均値（エラーバーは標準偏差）。Ca：カルシウムイオン濃度、Mg：マグネシウムイオン濃度。

(b) 実線は計15個のRFモデルによる計算値の平均値、網掛けは同標準偏差。

図は Kikuchi et al. (2023) © 2023 Elsevier B.V. より転載/改変して作成（転載/改変許諾済）

## 窒素フットプリントを活用した窒素負荷・化学肥料の削減効果と資源循環の見える化

環境中に排出される反応性窒素を定量化する指標である食の窒素フットプリントを活用し、窒素負荷の実態とその改善策が見える化する。亜熱帯に位置し農畜産業が盛んな沖縄県石垣島の場合、島内で産出される牛糞堆肥の70%を農地に還元することで、化学肥料使用量と島内の窒素負荷をそれぞれ30%および18%削減することができる。

キーワード：窒素フロー、牛糞堆肥、熱帯島嶼、みどりの食料システム戦略、SDGs

### 背景・ねらい

化学肥料の国際価格は、2022年半ばより高騰が始まり、世界中の農業に打撃を与えている。特に、その多くを輸入に頼る島嶼地域では、農業経営にとって深刻な影響が出ている。一方、化学肥料は作物生産にとって重要な資材であるが、作物が吸収しない窒素分が土壌下層へ溶脱し、地下水汚染などの環境への影響が問題視されている。この状況に対応するため、我が国では国内資源由来肥料の利用拡大に向けた取り組みが開始されているなど、域内で発生する有機資源を利用する資源循環型農業の重要性が再認識されてきている。資源循環により、農業生産における化学肥料の使用量削減および環境負荷の軽減が期待できる。

資源循環型農業が成り立つには、農業生産者の取り組みだけでなく、消費者がこの農業で生産された農作物を選択することが不可欠である。食の窒素フットプリントは、食料の生産から、加工、流通、消費、そしてヒトの排泄までの全過程から、どれ位の反応性窒素（窒素分子以外の窒素化合物。生物が利用可能。）が環境中に排出されるかを表す窒素負荷の指標であり、消費者の食の選択と環境負荷の関係を理解する一助となる。また、窒素負荷の主因の特定や、改善シナリオによる窒素負荷削減効果の定量化などに活用でき、消費者・生産者・行政等の関係者へ示すことができる。

本研究は、亜熱帯に位置する沖縄県石垣島に食の窒素フットプリントを適用し、輸出入を含む島の食料システムにおける窒素負荷の実態を把握すると共に、化学肥料使用量削減を目指したシナリオを検討する。

### 成果の内容・特徴

1. 石垣島の食料システム全体の食の窒素フットプリントの計算フレームを構築する。石垣島は農畜産業が主産業であることから、牛糞堆肥などの有機資源を農作物生産に分配する資源循環を考慮する（図1）。また、輸入食料・飼料の生産に伴う島外での窒素負荷や石垣島からの食料輸出も組み込む。これにより目標とする化学肥料使用量の削減に達するために必要な牛糞堆肥利用率を試算することが可能となる。

2. 国や県の施肥量や農地面積などの統計データを用いて、化学肥料使用量や牛糞堆肥利用率、未利用のまま環境中へ放出される窒素負荷を求める（図2a）。石垣島の場合、2018年現在、島内に流入してくる反応性窒素の半分以上は化学肥料であり、堆肥の利用率は13%と低い。
3. 島内で産出される牛糞堆肥を農地に還元する化学肥料使用量の削減シナリオを一例として検討する。その結果、島内で産出される牛糞堆肥の70%を農地で利用することで、化学肥料の使用量を3割削減できる。また、これにより島内の環境負荷は18%軽減できる（図2b）。
4. 食の窒素フットプリントの考えは、これまでは国や地域のスケールで適用されており、島嶼のスケールに適用し窒素負荷を評価する事例は本研究が初めてである。

### 成果の活用面・留意点

1. 構築した食の窒素フットプリント計算フレームは地域の有機資源の有効活用を通じた窒素の排出削減を検討し、消費者・生産者・行政等の関係者へ示すことができる。
2. みどりの食料システム戦略やSDGsに沿った取り組みを進める自治体の施策や、海外の熱帯島嶼地域での環境負荷軽減に活用できる。
3. 牛糞堆肥以外の有機物還元や環境負荷軽減技術の導入効果については今回の試算に含まれていないため、別途求めていく必要がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [A5 熱帯島嶼環境保全（第5期）]  
研究実施期間：2021～2023年度  
研究担当者：濱田耕佑（熱帯・島嶼研究拠点）、岡直子（農村開発領域）、江口定夫、平野七恵、朝田景（農研機構）  
発表論文等：Hamada et al. (2023) *Environmental Research Letters* 18: 075010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acdf04>

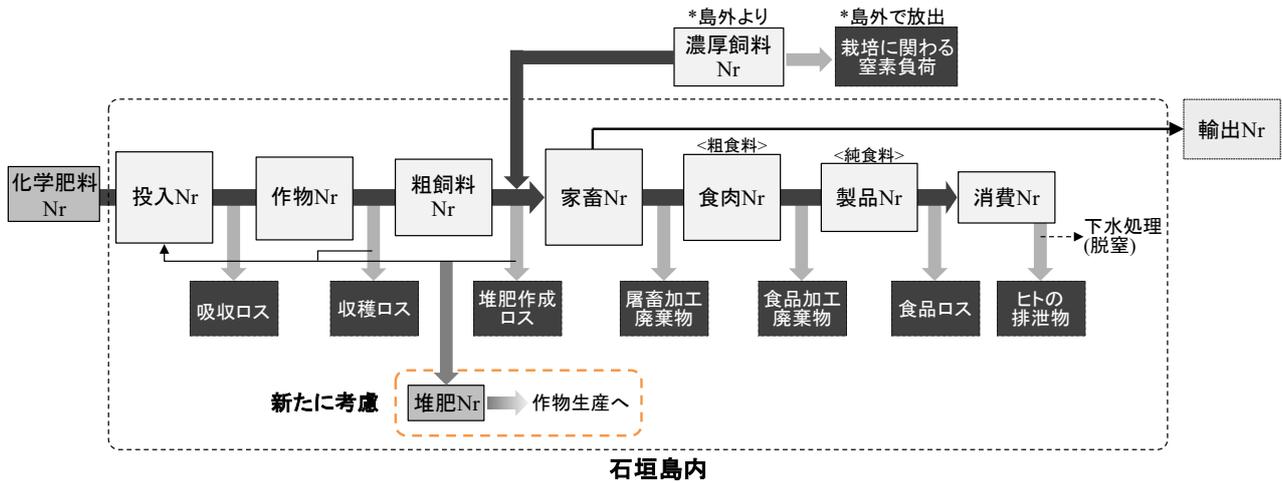
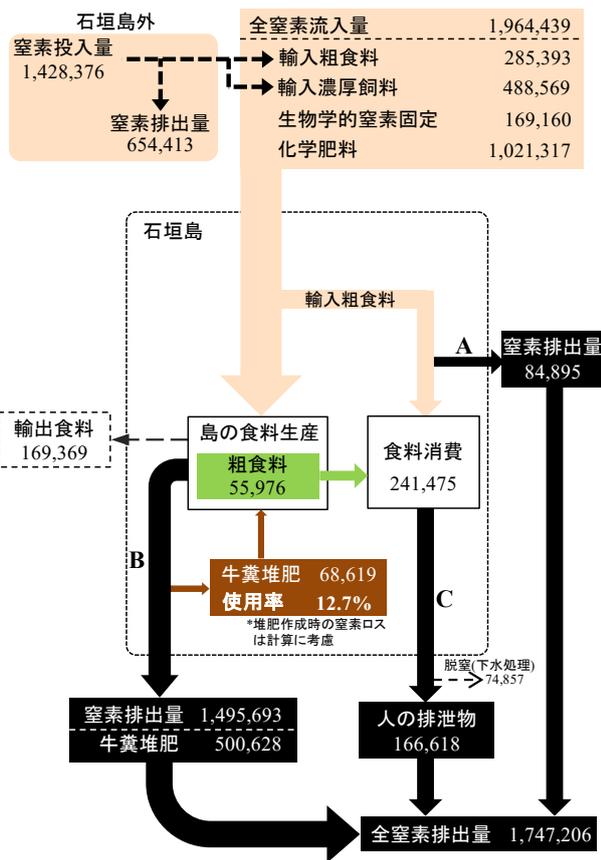


図1 食の窒素フットプリント計算フレームの概要（家畜生産の場合）

従来の食の窒素フットプリント計算では、堆肥中の反応性窒素（Nr）は家畜生産の計算フレーム内における農地（飼料作物）への還元のみが考慮されている。本研究では、家畜生産の計算フレームから飼料作物以外の作物生産の計算フレームへの再分配を新たに考慮しており、耕畜連携による資源循環を表現することが可能になる。

(a) 現況の窒素フロー (kgN)



(b) シナリオ条件下の窒素フロー (kgN)

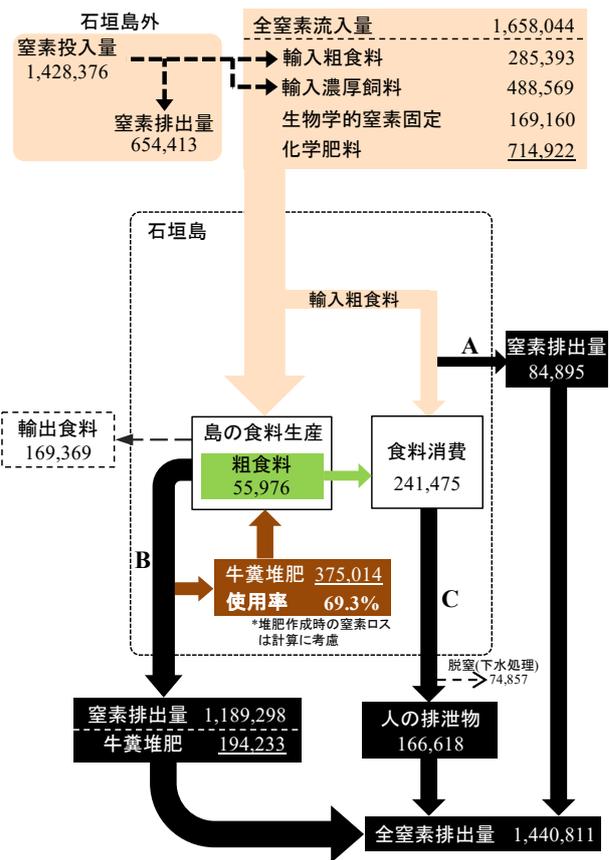


図2 石垣島の(a)現況および(b)シナリオ条件下の窒素フロー

矢印 A-C は、輸入粗食料の食品加工ロスおよび食品ロス(A)、食料生産に関わる窒素ロスから牛糞堆肥の利用を除いたもの(B)、食料消費後のヒトの排泄物(C)を表す。「家畜排せつ物法」に基づき、家畜糞尿は全て堆肥化されていると仮定し計算を行う。また、未利用の牛糞堆肥は、窒素ロスとして取り扱う。

## 脂質含量を減らさずにタンパク質含量を高める野生ダイズ由来対立遺伝子

野生ダイズ染色体断片置換系統群を利用して検出した、第19番染色体に座乗するタンパク質と脂質含量に関連する量的形質遺伝子座 *qPro19* の野生ダイズ対立遺伝子は、種子の脂質含量を減らさず、タンパク質含量を高める。本研究で同定した野生ダイズの対立遺伝子を用いて、タンパク質と脂質両方が向上した品種の開発が期待される。

キーワード：ダイズ、野生ダイズ、タンパク質、脂質、QTL

### 背景・ねらい

人間が消費するタンパク質と脂質の最も重要な供給源の一つであるダイズ種子には、約40%のタンパク質と約20%の脂質が含まれており、世界の植物性タンパク質の71%以上、油の29%以上を供給している。一般的に、ダイズのタンパク質含量は脂質含量と負の相関関係を示し、両方の含量が高い品種の開発は困難である。しかし、ダイズは、食料、工業原料、家畜飼料として、タンパク質と脂質の両方の含量が高い品種の需要が高まっている。このため、ダイズ生産国の中には、ダイズの種子の粗脂肪含量と粗タンパク質含量の合計を政府の新品種審査基準に用いている場合もある。タンパク質と脂質含量の両方が高い品種を育成するため、新しい遺伝子を探索する必要がある。ダイズの祖先種である野生ダイズ（ツルマメ）は栽培ダイズより高い種子のタンパク質含量を示し、栽培ダイズ品種のタンパク質含量を向上させるために重要な遺伝資源として注目されている。

国際農研は、野生ダイズから有用遺伝子を発掘するため、ダイズ品種「Jackson」と野生ダイズ「JWS156-1」の交配によるBC<sub>3</sub>F<sub>6</sub>世代の野生ダイズの染色体断片置換系統(CSSL)集団を作成し、ダイズ重要形質の遺伝解析を行っている（平成30年度国際農林水産業研究成果情報「ダイズ重要形質の遺伝解析のための野生ダイズの染色体断片置換系統群」）。本研究では、タンパク質含量を高める野生ダイズ由来遺伝子領域を特定するため、改めて同じ親系統を用いて、BC<sub>3</sub>F<sub>6</sub>世代よりも野生ダイズ由来の領域が狭まったBC<sub>4</sub>F<sub>6</sub>世代のCSSL集団を作成し、種子タンパク質及び脂質含量の評価と量的形質遺伝子座(QTL)解析を行う。

### 成果の内容・特徴

1. 栽培ダイズ品種「Jackson」と野生ダイズ系統JWS156-1を交配したのち、栽培ダイズを反復親として4回連続戻し交配並びに自殖を行い、BC<sub>4</sub>F<sub>6</sub>世代野生ダイズCSSL集団を作成する。
2. 計123系統のCSSL集団を3年間(2018、2019、2020)圃場で栽培し、種子のタンパク質、脂質の含量

を調査すると、元親品種「Jackson」より高い系統が確認される（図1）。

3. 計243個のDNAマーカー（SSRマーカー）を用いたQTL解析では、タンパク質、脂質およびタンパク質＋脂質含量に関連する計12個のQTLが8本の染色体に検出される。
4. 検出したQTLのうち、第19番染色体に座乗するQTL(*qPro19*)（図2）の野生ダイズの対立遺伝子は種子の脂質含量を減らさず、タンパク質含量を高める。
5. *qPro19*の効果を検証するため、*qPro19*の準同質遺伝子系統(NIL)を作成し、タンパク質および脂質含量の分析結果では、野生ダイズ型NILは栽培ダイズ型NILより高いタンパク質含量を示すが、脂質含量の有意な差を認めない。
6. *qPro19*の野生ダイズ対立遺伝子をダイズ品種「Tachiyutaka」（タンパク質含量44.2%）に導入したBC<sub>4</sub>世代戻し交配系統(T-678)は、脂質含量を減少させず、タンパク質含量を46.0%まで向上される（図3）。

### 成果の活用面・留意点

1. 本研究で同定したタンパク質含量QTL*qPro19*の野生ダイズの対立遺伝子は、ダイズのタンパク質と脂質両方の含量が高い品種の開発や、特定のダイズ品種のタンパク質の向上の遺伝子素材として利用できる。
2. *qPro19*の野生ダイズ対立遺伝子によって品種のタンパク質含量を向上させる効果は対象ダイズ品種の遺伝的背景に依存するため、導入対象品種によって異なるタンパク質含量の向上効果が得られる可能性がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [B1 レジリエント作物（第5期）、B2 不良環境耐性作物開発（第4期）]

研究実施期間：2018～2023年度

研究担当者：朴 チョル、許 東河（生物資源・利用領域）

発表論文等：Park et al. (2023) *Plant Genet. Resour.-Charact. Util.* 21: 409–417 <https://doi.org/10.1017/S1479262123000850>

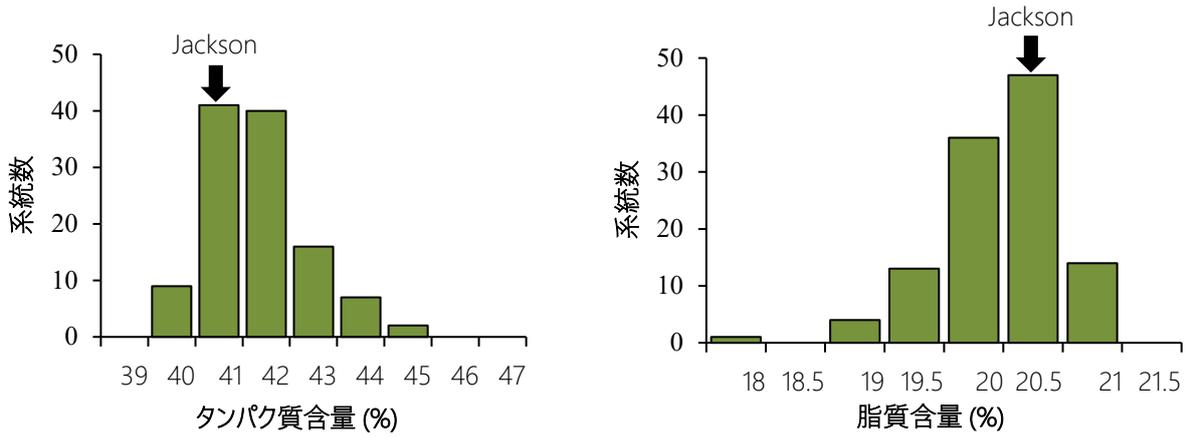


図 1 野生ダイズ CSSL 集団における種子のタンパク質含量（左）と脂質含量（右）の頻度分布  
 タンパク質含量と脂質含量は 2018、2019、2020 の 3 年間の平均値である。矢印は反復親である「Jackson」の観察値を表す。

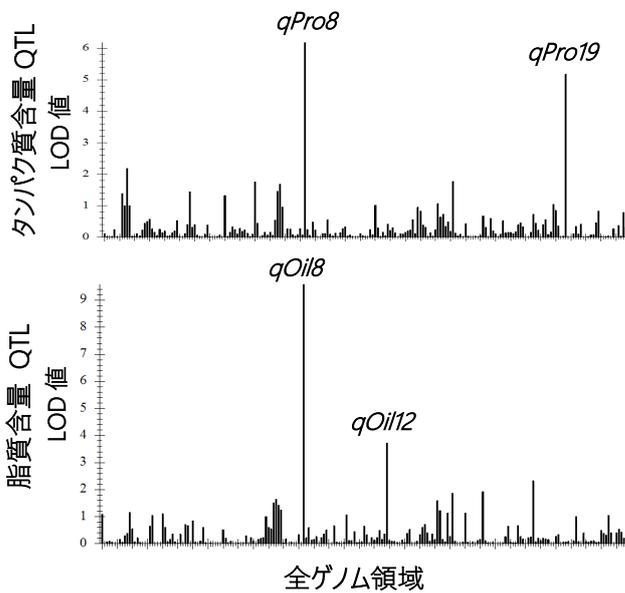


図 2 野生ダイズ由来 CSSL 集団において検出されたタンパク質含量 QTL と脂質含量 QTL  
 QTL は、2018、2019、2020 の 3 年間の平均値に基づいて検出されたものである。qPro19 は本研究で注目する第 19 番染色体に検出されたタンパク質含量の QTL である。qPro8 と qOil8 は第 8 番染色体に検出された既報のタンパク質含量と脂質含量の QTL である。qOil12 は第 12 番染色体に検出された脂質含量のマイナー-QTL である。LOD 値：形質と連鎖しているかどうかを統計学的に推定する値。

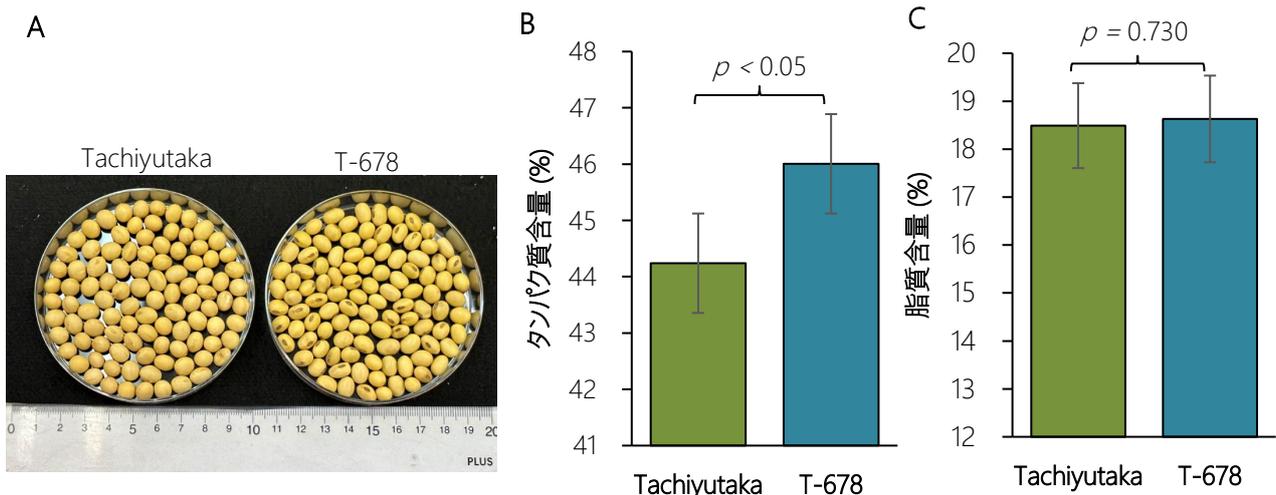


図 3 *qPro19* の野生ダイズ対立遺伝子を「Tachiyutaka」に導入した BC<sub>4</sub> 世代系統 T-678 の種子外観（A）およびタンパク質含量（B）と脂質含量（C）  
 エラーバーは標準偏差を表す。

図は Park et al. (2023) © The Author(s) 2023 より転載/改変して作成

## 畝を用いた圃場における作物干ばつストレス実験系の開発

高さ 30 cm の畝を用いることにより、圃場において安定して干ばつストレスを誘導することができる。畝を利用した干ばつストレス実験系は、圃場での干ばつ研究や耐性品種の選抜を、圃場での干ばつ研究や耐性品種の選抜を、安定的に安価かつ簡便に実施することを可能にする。

キーワード：畝、干ばつ、ダイズ、土壌水分、土壌養分

### 背景・ねらい

近年、干ばつの発生頻度と被害は増加しており、世界の食料供給が脅かされている。干ばつに強い作物の開発を目指して、これまで、実験室を中心に多くの干ばつ研究が進められ、分子レベルで植物の乾燥ストレス応答メカニズムが明らかにされてきた。一方で、圃場における植物の干ばつストレス応答は、実験室で解明されてきた応答メカニズムとは異なる点があることも指摘されているが、未だ不明な点が多い。干ばつに強い作物の開発において、圃場における植物の干ばつ耐性試験や干ばつ応答メカニズムの解明は必須であるが、環境が不規則に変動する圃場では、一定の干ばつ環境を再現することは容易ではない。圃場干ばつ試験では、灌水の有無による条件設定が一般的であるが、降雨が大きく影響するため、毎年の安定した試験は困難である。また、降雨による影響を排除するために、レインアウトシェルターなどの設備を用いた干ばつ研究も進められているが、コストや汎用性の面において課題もある。そこで、本研究では、安価で簡便かつ安定して実施することが可能な圃場干ばつストレス実験系の開発に取り組む。

### 成果の内容・特徴

1. 通常区（畝無し区）と比較して、高さ 30cm の畝条件下（畝区）では、土壌水分が一定レベル低下する（図 1A）。畝による低水分の誘導は、6 年以上の圃場試験を通して、様々な気象条件下でも再現できることを実証済みである。
2. 土壌中の主要な栄養成分は、ダイズの播種時期および収穫期いずれにおいても、通常区と畝区で同程度であり、畝は土壌養分に影響を与えない（図 1B）。
3. 畝区で栽培したダイズは、通常区と比較して生育が顕著に抑制され、収量も顕著に減少する（図 2）。
4. 畝区を含む試験区に灌水を行うと、畝区と通常区との生育差が小さくなることから、畝区におけるダイズの生育や収量の抑制は、主に土壌水分を反映している（図 3）。

### 成果の活用面・留意点

1. 本干ばつストレス実験系は、世界の様々な地域の圃場に適用出来ると考えられ、干ばつ耐性系統の選抜や作出を促進することが期待される。
2. 対象とする植物や土壌の種類、目的とする乾燥ストレスレベルに合わせて、畝の高さや幅などを検討する必要がある。

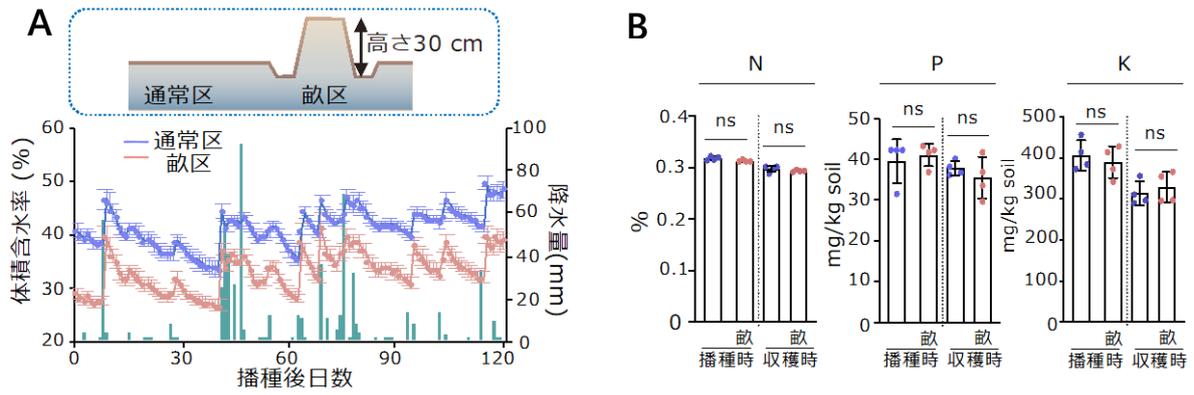
### その他

予算区分：交付金プロ [B1 レジリエント作物（第 5 期）、B2 不良環境耐性作物開発（第 4 期）、B2 環境ストレス耐性（第 3 期）]、外部資金 [SATREPS、ムーンショット型農林水産研究開発事業、科研費 18K05379]

研究実施期間：2015～2023 年度

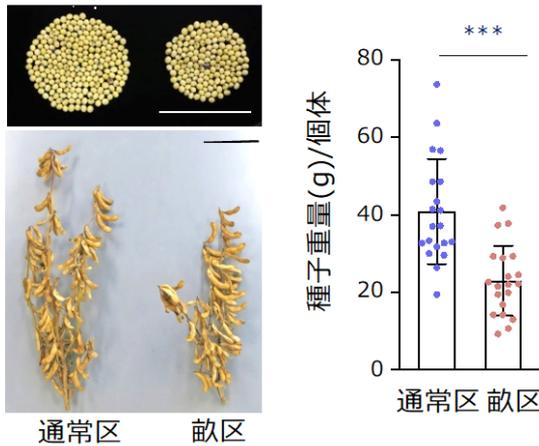
研究担当者：永利友佳理、小林安文、藤井健一郎、馬場隼也、藤田泰成（生物資源・利用領域）、伊ヶ崎健大、大矢徹治（生産環境・畜産領域）

発表論文等：Nagatoshi et al. (2023) *Nature Communications* 14: 5047. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40773-1>



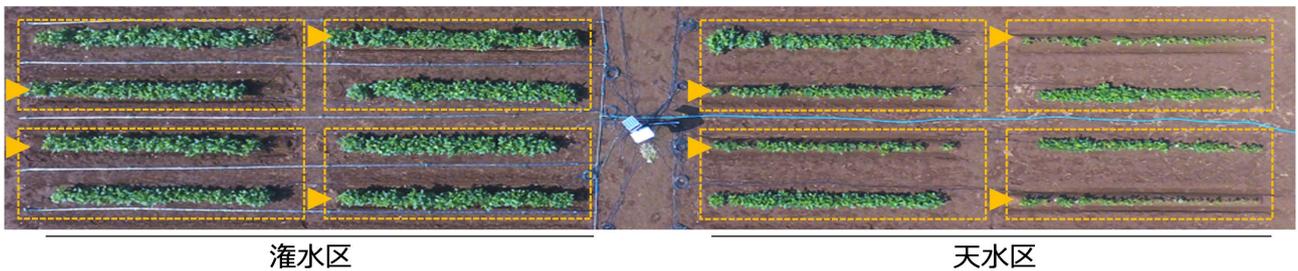
**図1 畝を用いた圃場干ばつストレス実験系における土壌水分変動と土壌栄養成分**

(A) ダイズ栽培期間中の通常区（畝無し）および高さ 30 cm の畝区における土壌水分変動。各試験区に長さ 30 cm の土壌水分センサー(TDR)および温度センサーを挿入し、データロガーにより経時的にデータを記録。n 数は 4、エラーバーは SD を示す。緑棒グラフは、降水量を示す。体積含水率と土壌水分ポテンシャルの関係は以下の通り。50.7% (-0.0039 MPa, pF 1.6), 44.9% (-0.0098 MPa, pF 2.0), 41.2% (-0.031 MPa, pF 2.5), 38.6% (-0.098 MPa, pF 3.0), および 26.3% (-0.61 MPa, pF 3.8)。 (B) ダイズ播種時期および収穫時期の通常区および畝区の土壌養分解析。n 数は 4、エラーバーは SD を、ns は有意差が無いことを示す (Student's t-test)。



**図2 畝を用いた圃場干ばつストレス実験系におけるダイズの生育**

本干ばつストレス実験系において栽培したダイズの収穫時の形態および収量。左側は通常区、右側は畝区を示す。写真中のバーは、10 cm を表す。n 数は 20、エラーバーは SD、アスタリスクは有意差があることを示す (\*\*P < 0.01, Student's t-test)。



**図3 畝を用いた圃場干ばつストレス実験系への灌水処理**

ドローンにより空撮した播種後約 7 週目のダイズの生育。畝区を黄色矢印で示す。点線で囲んだ 2 列は、通常区と畝区を含む 1 反復を示しており、試験は合計 4 反復で実施。右側は天水区（水やりをしない区）、左側は、右の天水区と同じ試験設計に灌水を行った試験区（灌水区）。中央の白い箱に、各列に挿入した土壌水分センサーと接続したデータロガーが格納されている。

## 植物の新たな干ばつストレス応答メカニズムの解明

葉の萎れが見られない程度の極めて初期の干ばつ時に、植物体内のリン酸含量が低下し、リン酸欠乏応答遺伝子の発現が誘導される。リン酸欠乏応答は、これまでにわかっていたアブシシン酸の応答が起こる前の乾燥ストレス初期に生じることから、干ばつ初期の植物の応答を捉える新たな指標として、植物の水分センサー開発などに応用できる。

キーワード：干ばつ、リン酸、アブシシン酸、ダイズ、シロイヌナズナ

### 背景・ねらい

水分欠乏は、作物の生育や生存を脅かす最も深刻な環境ストレスである。葉の萎れが見られない軽度の干ばつであっても、作物の生育は顕著に低下し、収量に甚大な影響をもたらす。そのため、このような“見えない干ばつ”を早期に捉え、灌水などの適切な対策をとることは作物の安定生産において重要である。しかし、圃場で生じる“見えない干ばつ”に対する作物の応答およびそのメカニズムの理解は進んでいない。本研究では、開発した畝を用いた干ばつストレス評価系を用いて、圃場における植物の干ばつ応答を捉えるとともに、実験室における詳細な解析やモデル植物を用いた解析を通して、圃場で生じる“見えない干ばつ”に対する植物の応答メカニズムおよびその生理学的意義を解明する。

### 成果の内容・特徴

1. 圃場において葉が萎れない程度の干ばつストレス（“見えない干ばつ”）を受けたダイズの葉では、リン酸が欠乏した際に機能する遺伝子群（リン酸欠乏応答遺伝子）の発現が誘導される（図1）。
2. “見えない干ばつ”を受けたダイズの葉において、植物の生育に必要な主要元素（窒素、リン酸、カリウム）の中でリン酸（P）含量が最も減少する。
3. 温室および人工気象器内でポット内の土の水分量をコントロールして栽培したダイズでは、乾燥ストレスの初期段階に、土壤水分依存的にリン酸欠乏応答遺伝子の発現が誘導される。さらに、乾燥ストレスが強くなると、乾燥ストレス応答などで重要な働きをすることが知られているアブシシン酸(ABA)に応答する遺伝子群の発現が誘導される（図2）。
4. モデル植物であるシロイヌナズナにおいても、ABA 応答遺伝子の発現が誘導される前の乾燥ストレス初期に、リン酸欠乏応答遺伝子の発現が誘導されることから、新たに見いだした現象は、植物に普遍的であることが示唆される。

5. リン酸欠乏応答が誘導されないシロイヌナズナ欠損変異体では、通常の野生株と比較して乾燥ストレスによって生育が顕著に抑制されることから、乾燥ストレス初期のリン酸欠乏応答遺伝子の発現誘導は、乾燥ストレス時の生育を維持するために重要な役割を担うことが示唆される（図3）。

### 成果の活用面・留意点

1. リン酸含量やリン酸欠乏応答遺伝子の発現は、“見えない干ばつ”を早期に捉える指標として、植物の水分センサー開発などに貢献することが期待される。
2. “見えない干ばつ”時におけるリン酸欠乏応答の誘導は植物に普遍的な現象であると考えられるが、土壤水分以外の環境条件もリン酸欠乏応答の誘導に影響を与える可能性を考慮する必要がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [B1 レジリエント作物（第5期）、B2 不良環境耐性作物開発（第4期）、B2 環境ストレス耐性（第3期）]、外部資金 [SATREPS、ムーンショット型農林水産研究開発事業、科研費 18K05379]

研究実施期間：2015～2023年度

研究担当者：永利友佳理、小林安文、藤井健一郎、馬場隼也、藤田泰成（生物資源・利用領域）、伊ヶ崎健大、大矢徹治（生産環境・畜産領域）、水野信之、安井康夫（京大）、杉田亮平（名大）、竹林裕美子、小嶋美紀子（理研）、榊原均（理研、名大）、小林奈通子、田野井慶太郎（東大）、小木曾映里、石本政男（農研機構）

発表論文等：Nagatoshi et al. (2023) *Nature Communications* 14: 5047. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40773-1>

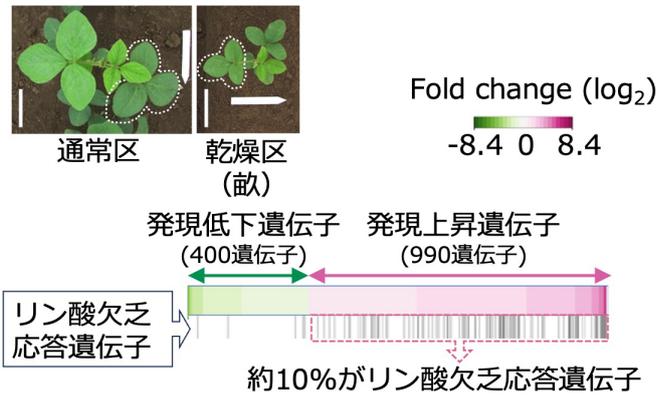


図1 圃場干ばつ条件下のダイズの葉におけるリン酸欠乏応答遺伝子の誘導

圃場の畝を用いた干ばつストレス評価系で栽培したダイズのトランスクリプトーム解析。播種後31日目のダイズの第2葉（写真点線）をRNA-seq解析に使用。写真中のバーは、10 cmを表す。

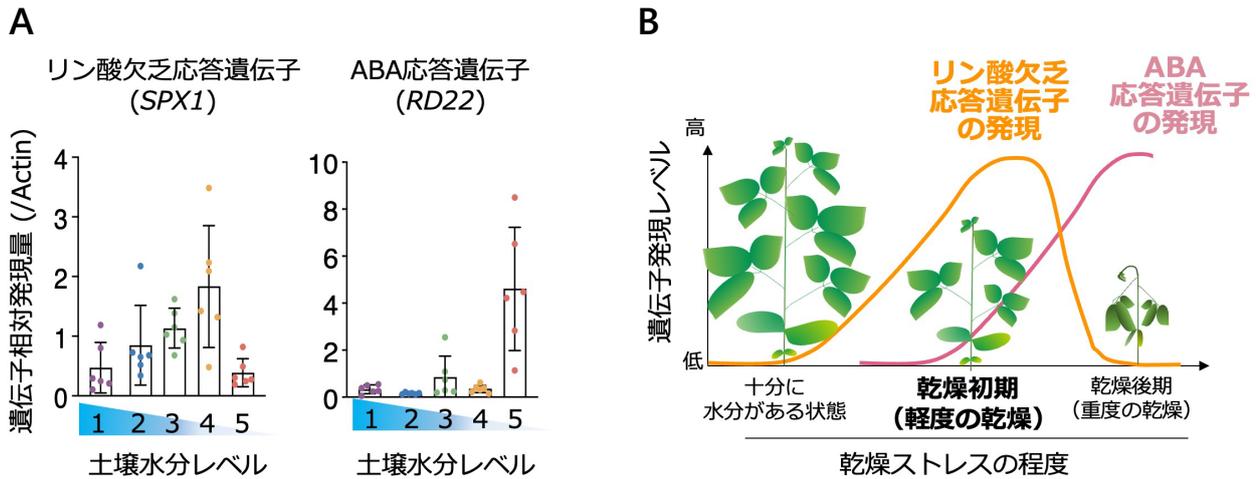


図2 軽度の乾燥時に土壤水分依存的に誘導されるリン酸欠乏応答遺伝子とABA応答遺伝子の発現

(A) 温室においてポット内の土壤水分レベル（レベル 1-5; 数値が大きいくほど水が少なく、乾燥の程度が強い）を制御して栽培したダイズの遺伝子発現解析。n数は6、エラーバーはSD。(B) 新規に提示する植物の乾燥ストレス応答のモデル図。



図3 リン酸欠乏応答が誘導されないシロイヌナズナ変異体の乾燥ストレス応答

乾燥ストレスを処理したシロイヌナズナ野生株およびリン酸欠乏応答が誘導されないシロイヌナズナ変異体の生育変化。乾燥ストレス処理後（栽培ポットへの給水を停止後）1, 3, 6, 7日目の地上部のバイオマス量を示す。写真中のバーは、1 cmを表す。n数は4、エラーバーはSDを示す。

図は Nagatoshi et al. (2023) © The Author(s) 2023 より転載/改変して作成

## 植物の硝酸イオン吸収を数理モデルにより予測

植物の主要な窒素源である硝酸イオンの利用に関わる *NRT2* 遺伝子の制御システムの数理モデル化により、異なる条件における植物の硝酸イオン吸収を予測できる。数理モデルを用いたシミュレーションにより、転写抑制因子である *NIGT1* が窒素栄養環境の変化に対する *NRT2* 遺伝子の発現の安定化に寄与することが理論的かつ実験的に示される。この結果は、特定の植物形質のデザインとスマート育種における数理モデルの有用性を示唆する。

キーワード：硝酸イオン、常微分方程式、数理モデル、合成生物学、イネ

### 背景・ねらい

植物の主要な栄養素のうち、窒素は根で吸収され、核酸やタンパク質などの生体分子の構成成分となる。代表的な窒素源である硝酸イオンとアンモニウムイオンのうち、硝酸イオンは酸化環境で多く存在し、その供給量は植物の生育と密接に関わる。しかし、硝酸イオンの過度な吸収は、エネルギーの過度な消費や病原抵抗性の低下を引き起こすため、植物は根における主要な硝酸輸送体である *NRT2* の遺伝子発現の緻密な制御により、硝酸イオンの吸収量を調節する。窒素吸収を人為的に調節するためには *NRT2* 遺伝子の発現量の制御が必要であるが、複雑な制御システム下にある植物応答の変化の直感的な理解は困難である。そのため、植物工場などの制御環境における窒素吸収の最適化した作物、およびレジリエンス強化作物の設計のためには、制御システムの変化がもたらす応答の変化を定量的に理解する必要がある。

本研究では、これまでに多くの知見が蓄積されているモデル植物シロイヌナズナにおいて、*NRT2* 遺伝子の制御システムを数理モデルにより統合的に解析し（図1）、*NRT2* を介した硝酸イオン利用の調節に重要な制御因子を明らかにする。

### 成果の内容・特徴

- シロイヌナズナの硝酸イオン輸送体遺伝子 *NRT2.1* の既知の制御システム（図2A）に関わる係数を、実測データの数式への当てはめにより取得し、常微分方程式を用いた数理モデルにより、*NRT2.1* 遺伝子および制御を構成する分子の時間的挙動を定量的に表す（図1）。
- 数理モデルに基づいた、野生型植物と、転写抑制因子である *NIGT1* による制御を欠損させた植物におけるシミュレーションにより、転写促進因子であり、硝酸イオン濃度に応じて活性化する *NLP* と *NIGT1* からの制御が、外界の硝酸イオン濃度が変動する条件において、*NRT2.1* 遺伝子の発現を安定させることを予測できる（図2B）。

- 野生型の植物では、外界の硝酸イオン濃度が変化する条件においても *NRT2.1* 遺伝子の発現が安定しているのに対し、*NIGT1* による制御システムを破壊した植物では、外界の硝酸イオン濃度依存的に *NRT2.1* 遺伝子の発現量が大きく変化することから、レジリエンスの発揮に *NIGT1* が重要であることを実験的に示す（図3）。これは、図2Bの数理モデルから予測される挙動と一致しており、モデルの有効性を示す。

### 成果の活用面・留意点

- 数理モデルを用いた植物のレジリエンス機構の定量的な扱いにより、合成生物学等を利用した植物の形質デザインおよびスマート育種を加速化するツールとして活用できる（図1）。
- NRT2* 遺伝子の同様の制御システムは、嫌気的な土壌環境で生育するイネをはじめとする多くの植物種においても保存されており、この手法は、幅広い作物種における窒素吸収の最適化に活用可能である。
- 作物種における応用のためには、制御に関わるパラメータなどの基盤的データの拡充が必要である。

### その他

予算区分：交付金プロ [B1レジリエント作物（第5期）]、外部資金 [JST 戦略的創造研究推進事業 CREST]  
研究実施期間：2020～2023 年度  
研究担当者：植田佳明（生産環境・畜産領域）、柳澤修一（東京大）  
発表論文等：Ueda and Yanagisawa (2023) *Plant Physiology* 193: 2865 – 2879. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad458>

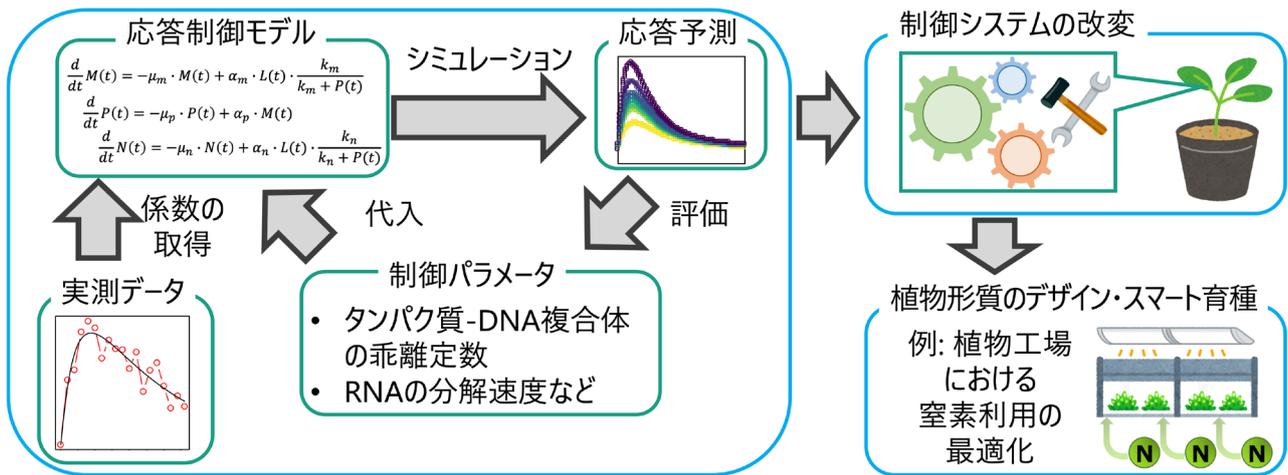


図1 数理モデルの構築とその活用の概念図

実測データを用いて構築した定量的な応答制御モデルを、シミュレーションによる応答予測に用いる。制御パラメータを数式上で変化させ、異なるパラメータが応答に与える影響を評価する。シミュレーション結果を元に、実際の植物分子と関連する制御システムを変更し、望ましい形質を付与したデザイン作物の迅速な作出に活用する。

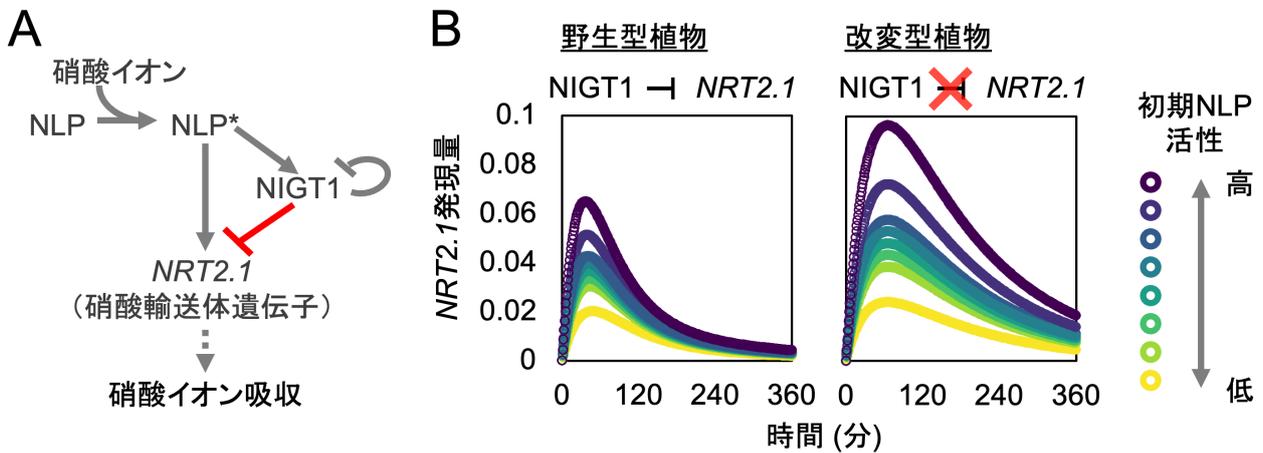


図2 硝酸イオン利用に関わる制御システムとその応答予測

(A) 硝酸イオンの利用に関わる制御システム。矢印は促進的な制御を、T印は抑制的な制御を表す。NLP\*は、硝酸イオンの存在下で活性化した状態のNLPタンパク質を表す。(B) NRT2.1遺伝子の制御因子の一つ、NLPの活性を変化させた場合の、数理モデルによるNRT2.1遺伝子の時間的挙動の野生型植物（左）と改変型植物（右）における予測。改変型植物では、NIGT1からNRT2.1遺伝子への制御の欠損によりAの赤字で示した構造が破壊される。

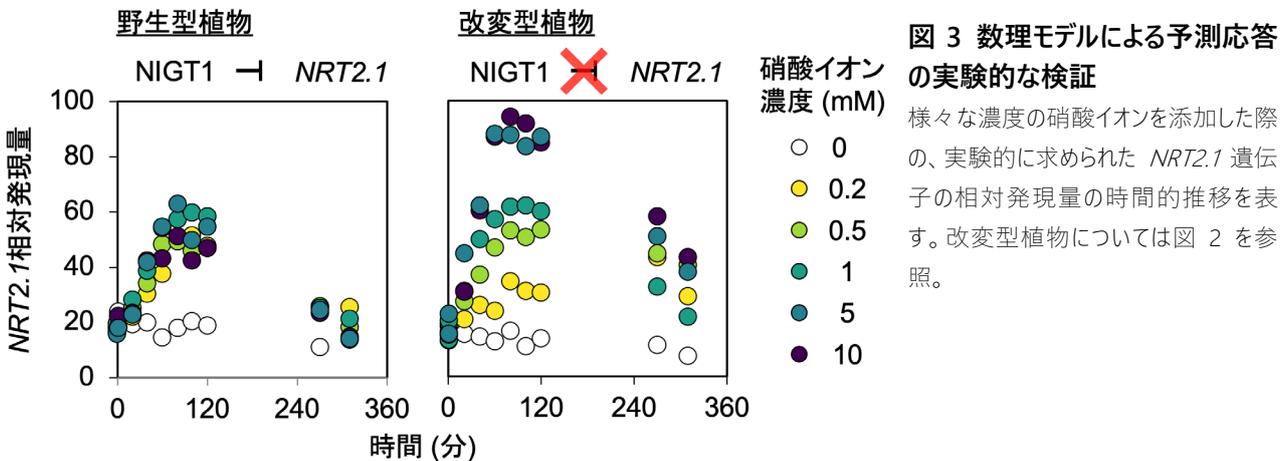


図3 数理モデルによる予測応答の実験的な検証

様々な濃度の硝酸イオンを添加した際の、実験的に求められたNRT2.1遺伝子の相対発現量の時間的推移を表す。改変型植物については図2を参照。

## 適切なリンの肥培管理により黒米の生産性と品質を両立できる

リンの供給力が低い熱帯地域の土壌では、リン施肥によって黒米の収量が向上するが、過剰なリン施肥は抗酸化力を持つフラボノイド類量を減少させ、玄米表面色の黒色を薄くする。適切なリンの肥培管理により、付加価値の高い黒米の安定生産が可能になる。

キーワード：リン施肥、黒米、フラボノイド、外観品質

### 背景・ねらい

東南アジア地域では、古くから薬として黒米を摂取する習慣がある。黒米の種皮や果皮にはアントシアニンなどの抗酸化力がある二次代謝産物が含まれ、肝機能の回復や認知症予防などの薬理効果が報告されている。

黒米食の文化があるラオス等の熱帯地域の土壌は、作物の重要な栄養素であるリンの供給力が低いため、生産性向上のためにはリン肥料の施肥が不可欠である。しかし、近年の肥料の高騰化や稲作の省力化に対応するために、適切なリン施肥量を検討する必要がある。また、リン供給によるフラボノイド類の蓄積効果を検証した例は少ないため、リン施肥がフラボノイド類の蓄積に及ぼす影響を明らかにする必要もある。

近年、健康志向の高まりにともない、黒米の機能性が注目されており、付加価値の高い黒米を安定供給するためには、抗酸化力のあるフラボノイド類\*を高蓄積した黒米の栽培方法を検討する必要がある。本研究ではリン欠乏土壌を用いてポット試験栽培を行い、リン施肥による黒米の収量と抗酸化能の指標とされるフラボノイド類量を解析して、黒米の生産性と品質を両立させるための適切なリンの肥培管理を検討する。

\*フラボノイド類：植物の二次代謝産物でアントシアニン等が含まれる。

### 成果の内容・特徴

1. リン供給力が限られる火山灰土壌を用いた黒米のポット試験栽培では、リンの施肥で収量は増加する（図1）。リン施肥量が  $250 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ ポット}^{-1}$  を超えると、増収効果は認められないため、 $250 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ ポット}^{-1}$  を超えるリン施肥は収量性向上において過剰である。
2. リンの施肥で、抗酸化能の指標とされるフラボノイド類量は減少する。収量が頭打ちとなるリン施肥量（ $250 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ ポット}^{-1}$ ）を超えると、フラボノイド類量はさらに減少する（図2）。そのため、 $250 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ ポット}^{-1}$  を超えるリン施肥はフラボノイド蓄積において過剰である。
3. 黒米の市場価値において重要な外観品質である玄米

の表面色は、リン施肥で明度が上昇して、黒色が薄くなる（図3）。収量が頭打ちとなるリン施肥量（ $250 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ ポット}^{-1}$ ）を超えると、黒色はさらに薄くなるため、 $250 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ ポット}^{-1}$  を超えるリン施肥は外観品質において過剰である。

4. 以上の結果から、リン欠乏土壌におけるリン施肥は黒米の収量を改善するが、収量向上に寄与しない過剰なリン施肥は、フラボノイド類と外観品質を低下させるため、高付加価値の黒米を生産するためには、適切なリンの肥培管理が重要である。

### 成果の活用面・留意点

1. 抗酸化力等の機能性が注目されている黒米栽培において、黒米の生産性と機能性及び外観品質を両立させる有用な知見として活用できる。
2. 最適なリン施肥量は土壌によって異なるため、栽培地域の土壌に応じた施肥指針の設定が必要である。

### その他

予算区分：交付金プロ [B2 新需要創造（第5期）]、外部資金 [科研費 22K05942]

研究実施期間：2021～2022 年度

研究担当者：アウンゾーウー、浅井英利、高井俊之、田中ファン（生産環境・畜産領域）、丸井淳一郎、中原和彦（生物資源・利用領域）、齊藤大樹（熱帯・島嶼研究拠点）、川村健介（社会科学領域、現・帯広畜産大学）、Win, K.Z.（農研機構）

発表論文等：Oo et al. (2023) *Front. in Sustain. Food Syst.* 7:1200453. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1200453>

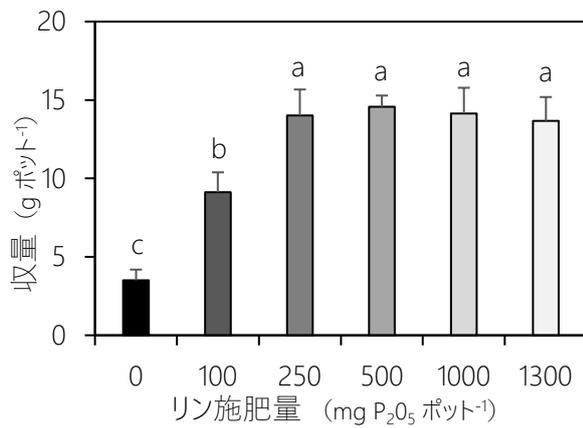


図1 リン施用による収量の増加

リン供給能に限られる火山灰土壌を用いて、リン施肥量が異なるポット条件下（0-1300 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ポット<sup>-1</sup>（1/5000a ワグネルポット））において、黒米「朝紫」の栽培を行った。異なるアルファベットは5%水準で有意に異なることを示す（Tukey法、n=5）。図中のエラーバーは標準偏差を示す。

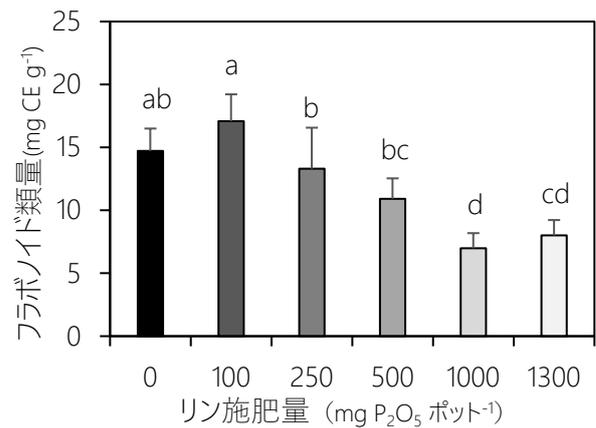


図2 リン施肥による玄米のフラボノイド類量の減少

異なるアルファベットは5%水準で有意に異なることを示す（Tukey法、n=5）。図中のエラーバーは標準偏差を示す。

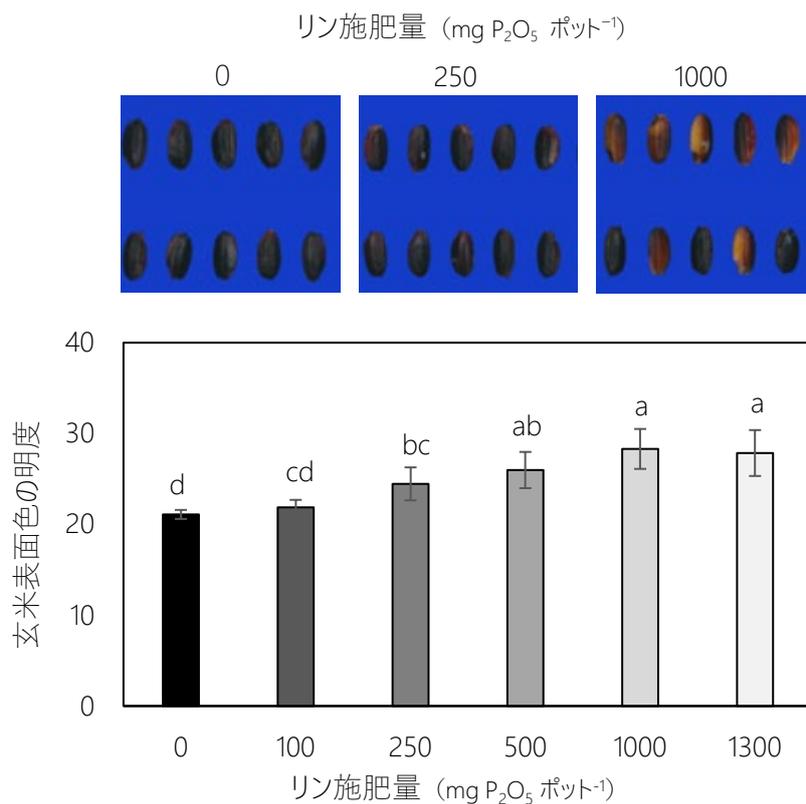


図3 リン施肥による玄米表面色の明度の増加

GrainScanner（Satake Co., Ltd.）を用いて、GIE-Lab 法により玄米表面色の明度を計測した。明度が100に近いほど白色、0に近いほど黒色を呈する。異なるアルファベットは5%水準で有意に異なることを示す（Tukey法、n=5）。写真はリン施肥量が0、250、1000 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ポット<sup>-1</sup>の黒米の玄米表面色を示す。

図は Oo et al. (2023) © The Author(s) 2023 より転載/改変して作成

## ツマジロクサヨトウの殺虫剤感受性を国際間で比較するための簡易検定法

検定に供試する個体の採集法、入手が容易な材料で作成する人工飼料による供試虫の累代飼育法、人工飼料を用いる殺虫剤塗布法から構成される簡易検定法を用いることで、越境性害虫であるツマジロクサヨトウの殺虫剤感受性を容易に国際間で比較できる。

キーワード：ツマジロクサヨトウ、殺虫剤感受性、殺虫剤抵抗性管理、人工飼料、トウモロコシ

### 背景・ねらい

ツマジロクサヨトウ (*Spodoptera frugiperda*) は、南北アメリカ大陸が原産の害虫であるが、近年、アフリカ及びアジアに侵入し、その分布域を急速に拡大している。本種は、トウモロコシを中心に 80 種類以上の作物を食害する（図 1）。原産地およびアフリカ大陸では、多くの殺虫剤に対する抵抗性の発達が報告されており、安価かつ容易に入手できる特定の殺虫剤が連用されるアジアにおいても、同剤を中心とする殺虫剤に対する抵抗性の発達が懸念される。

ツマジロクサヨトウの成虫は長距離移動能力を持つため、任意の地域で殺虫剤に対する抵抗性を獲得した系統が出現すると、近隣諸国に急速に拡散する可能性が高い。従って、本種の殺虫剤抵抗性系統のまん延を抑制するには、その感受性の変化を同一の方法を用いて広域かつ網羅的にモニタリングし、その結果を速やかに共有することが肝要である。

そこで本研究では、開発途上地域を含む東南アジア等におけるツマジロクサヨトウの殺虫剤感受性のモニタリングを可能にするため、比較的容易に入手できる材料を用いた簡易な殺虫剤感受性検定法を開発する。また、開発した方法を用いて網羅的な比較を実施できるか検証するため、タイ国内における本種の殺虫剤感受性の変化をモニタリングする。

### 成果の内容・特徴

1. 本簡易検定法は、供試虫の採集法、比較的入手が容易な材料で作成する人工飼料を用いた大量飼育法、同人工飼料を用いる感受性検定法から構成される（図 2）。この方法を用いることで、既存の殺虫剤抵抗性遺伝子の多型を指標とした分子生物学的検定法および局所施用法等の生物検定法と比較し、多くの種類の殺虫剤を対象とした検定を容易に実施できる。
2. 供試虫は調査地域あたり 300 個体以上採集する。
3. 人工飼料は、組成 A を煮沸し、冷却後に組成 B を加え攪拌、最後に組成 C を加えて作成する（表 1）。凝固する前に、プラスチックカップに 5ml ずつ分注する。冷蔵庫で保管し、ツマジロクサヨトウに与える前に室温

に戻す。この人工飼料を餌として与えることで、1 齢幼虫を蛹まで飼育できる（図 3）。

4. 感受性試験は、採集後 3 世代以内の 3 齢幼虫を用いて殺虫剤塗布法により実施する。蒸留水を用いて任意の倍数に段階的に希釈した殺虫剤 200ul を 5ml の人工飼料に塗布する。乾燥後、3 齢幼虫 10 頭を導入し 72 時間後の死亡個体数を計数する。得られた結果から、半数致死濃度を計算する。
5. タイの主要なトウモロコシ産地から採集した個体群を用いて、東南アジア諸国でツマジロクサヨトウ対策として使用されている、もしくは使用が計画されている殺虫剤の感受性を評価すると、複数の殺虫剤で、経時的な殺虫剤感受性の低下が検出されており、開発した手法は国際間等の網羅的な比較に使用できる精度である（表 2）。

### 成果の活用面・留意点

1. 本研究で開発された手法は、ツマジロクサヨトウの殺虫剤感受性を国際間で比較し対策をたてるために利用できる。
2. タイでは複数の殺虫剤に対してツマジロクサヨトウの感受性が低下していることから、早急に代替となる防除手段を確立する必要がある。
3. ツマジロクサヨトウの幼虫に人工飼料を与えた時の生存率は、3-6 齢ではトウモロコシ生葉と同等であるが、1-2 齢ではトウモロコシ生葉より低くなるため、同時に多くの殺虫剤を検定する必要がある場合、1-2 齢幼虫に対しては生葉を与えて飼育する。

### その他

予算区分：交付金プロ [B3 越境性害虫（第 5 期）]

研究実施期間：2021~2023 年度

研究担当者：小堀陽一（生産環境・畜産領域）、Thirawut, S.、Sutjaritthammajariyangkun, W.、Rukkasikorn, A.、Punyawattho, P.、Noonart, U.（タイ農業局植物保護研究開発部）

発表論文等：Thirawut et al. (2023) *CABI Agriculture and Bioscience* 4: 19. <https://doi.org/10.1186/s43170-023-00160-8>



図1 トウモロコシを食害する  
ツマジロクサヨトウ幼虫

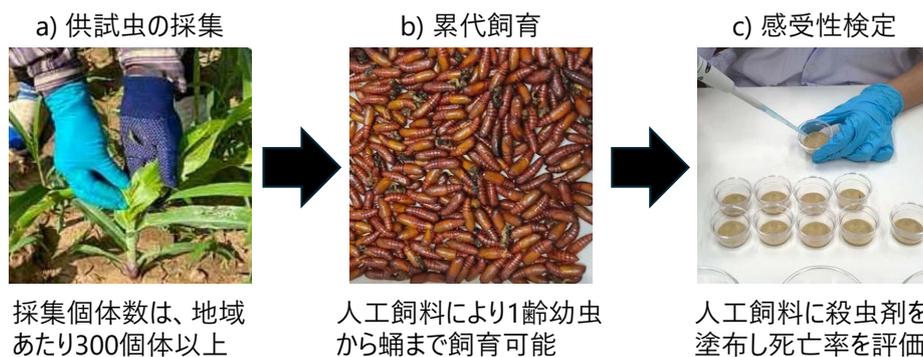


図2 殺虫剤感受性簡易検定法の概略

表1 人工飼料の材料

	材料	量
組成A	寒天	25g
	純水	800ml
組成B	ホルマリン	4ml
	酵母	20g
	メチルパラベン	5g
	ソルビン酸	3g
組成C	緑豆粉	240g
	純水	800ml
	ビタミンC	5g
	ビタミン水溶液 <sup>1)</sup>	40ml

1) B1 2.5g、B2 3g、B6 1.5g、B7 5m、B9 2.5g、B12 20mg、D-パントテン酸ヘミカルシウム塩 3g、塩化コリン 10g、イノシトール 5g、ニコチン酸 6g、純水 1,000ml



図3 人工飼料を用いた飼育系  
で蛹化したツマジロクサヨトウ

表2 タイ国内における殺虫剤感受性試験の結果

殺虫剤名	採集年（採集地）	半数致死濃度 (mg/L) <sup>1)</sup>
エマメクチンベンゾエート 1.92%乳剤	2019（カンチャナブリ）	0.014 (0.013–0.016)
	2019（ターク）	0.015 (0.013–0.018)
	2021（スパンブリ）	0.017 (0.014–0.025)
	2021（ロップリー）	0.029 (0.023–0.039)
	2022（ルーイ）	0.027 (0.021–0.036)
インドキサカルブ 15%乳剤	2019（カンチャナブリ）	1.526 (0.982–2.048)
	2019（ターク）	1.877 (1.402–2.337)
	2021（ロップリー）	5.259 (3.554–9.019)
	2022（サーケオ）	7.530 (5.772–10.645)
	2022（ルーイ）	10.466 (7.909–15.650)
クロルフェナピル 10%SC剤	2019（カンチャナブリ）	2.086 (1.268–3.450)
	2019（ターク）	2.049 (1.243–3.360)
	2021（ロップリー）	7.056 (6.120–8.122)
	2022（サーケオ）	7.733 (6.714–8.915)
	2022（ルーイ）	8.874 (7.669–10.284)

実験は、約30反復行う。

1) 半数致死濃度の上昇は、感受性の低下を示唆する。カッコ内の数値は95%信頼限界を示す。

図表は Thirawut et al. (2023) © The Author(s) 2023 より転載/改変して作成

## 穂数を増加させる量的遺伝子座 *MP3* は高 CO<sub>2</sub> 環境でイネを増収させる

温帯ジャポニカ品種コシヒカリ由来の量的遺伝子座 *MP3* は、インディカ品種の分けつ数・穂数を 20～30%増加させ、高 CO<sub>2</sub> 環境で 6%増収させる。*MP3* のインディカ品種への利用により、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が続く気候変動下での国内外の持続的な稲作への貢献が期待される。

キーワード：イネ、*MP3*、穂数、気候変動、高 CO<sub>2</sub> 環境

### 背景・ねらい

温室効果ガスの1つである CO<sub>2</sub> の大気中濃度は、今世紀末に 430～1,000ppm に達し、地球の平均気温は産業化以前（1850～1900 年）に比べて 1.0～5.7°C 上昇すると予測されている。気温の上昇は、地域により作物の生産性に負の影響をもたらす一方で、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇は、植物の光合成を促進させる正の効果を持つ。そのため、増加した光合成産物を貯蔵する籾等の器官を十分備えた作物は増収に寄与すると考えられ、これら作物の高 CO<sub>2</sub> 濃度下での利用は、気候変動に負けない持続的な作物生産に繋がる可能性がある。

イネの温帯ジャポニカ品種コシヒカリから見出された量的遺伝子座 *MP3* (*MORE PANILCES 3*) は、インディカ多収品種タカナリの分けつ発生を促進させ、穂数・粒数を増加させる（令和2年度国際農林水産業研究成果情報「量的遺伝子座 *MP3* の導入は養分欠乏によるイネの穂数不足を緩和する」）。本研究では、マップベースクローニングにより *MP3* の原因遺伝子を特定し、*MP3* が効果を発揮するイネ品種群を明らかにするとともに、*MP3* によって増加した籾が高 CO<sub>2</sub> 環境で登熟することで増収に寄与することを検証する。

### 成果の内容・特徴

- MP3* の原因遺伝子は第 3 染色体長腕に座乗する *OsTB1* (*TEOSINTE BRANCHED1*) であり、コシヒカリとタカナリ間で遺伝子領域内の 3ヶ所に、配列の差が存在する（図 1）。
- MP3* の 3ヶ所の配列差をもとにイネ品種群を分類すると、温帯ジャポニカ品種の 74%、熱帯ジャポニカ品種の 10%がコシヒカリと同じ配列（コシヒカリ型）をもつ。一方で、インディカ品種の 60%はタカナリと同じ配列（タカナリ型）であり、コシヒカリ型は調査した 191 品種のうちわずかに 1 品種である（図 2）。
- タカナリ型 *MP3* を有する熱帯多収インディカ品種 IR64 および国内最多収インディカ品種北陸 193 号をコシヒカリ型 *MP3* に入れ換えた準同質遺伝子系統（NIL）は、タカナリを背景とした場合と同様に、親品種に比べて穂数を 20～30%増加させる（図 3）。

- タカナリおよびタカナリ背景 NIL を大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が自然条件 (390ppm) および約 200ppm 高い開放系 CO<sub>2</sub> 増加条件 (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment: FACE, 580ppm) の水田圃場で栽培したところ、自然条件では両者の間で収量に差は見られない一方で、FACE 条件では NIL がタカナリよりも約 6%増収する（図 4）。

### 成果の活用面・留意点

- 世界の稲作面積の 80%以上でインディカ品種が栽培されていることから、コシヒカリ型 *MP3* は、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が続く気候変動に対応する国内外のイネ育種において幅広い活用が期待できる。
- 高温条件下での *MP3* の穂数および収量への効果については、今後検証が必要である。

### その他

予算区分：交付金プロ [B5 アフリカ稲作システム（第 5 期）]、外部資金 [SATREPS、科研費 20H02972]

研究実施期間：2017～2022 年度

研究担当者：高井俊之、辻本泰弘、浅井英利（生産環境・畜産領域）、川村健介（社会科学領域）、圓山恭之進（生物資源・利用領域）、石崎琢磨、小林伸哉（熱帯・島嶼研究拠点）、谷口洋二郎、高橋徳、廣瀬咲子、原奈穂、三王（荒井）由美子、堀清純、福岡修一、酒井英光、常田岳志、臼井靖浩、近藤始彦、長谷川利拓、宇賀優作（農研機構）、赤司裕子、井藤純、辻寛之（横浜市立大学）、持田恵一（理化学研究所）、山本英司（明治大学）、長崎英樹（かずさ DNA 研究所）、中村浩史（太陽計器）

発表論文等：Takai et al. (2023) *The Plant Journal* 114: 729–742. <https://doi.org/10.1111/tpj.16143>

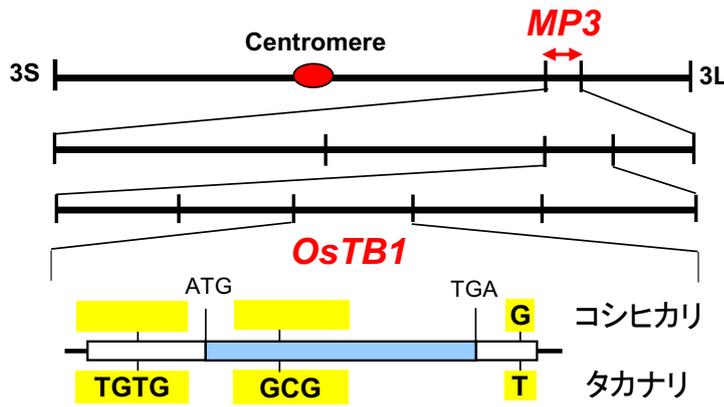


図1 マップベースクローニングによるMP3の原因遺伝子の特定およびコシヒカリ/タカナリ間での配列の比較

黄色で記した3ヶ所に配列の違いが存在する。空白の黄色は対応する配列が欠失していることを示す。

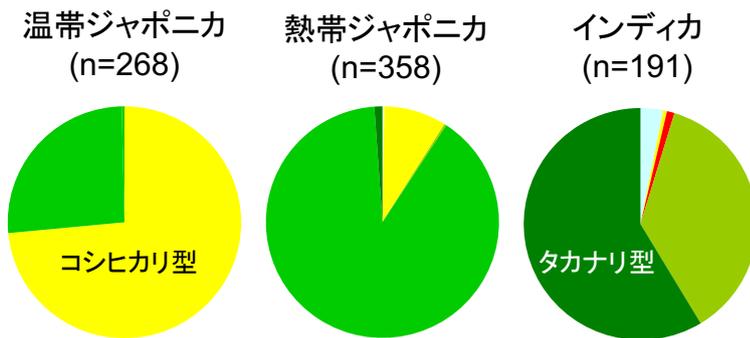


図2 温帯ジャポニカ、熱帯ジャポニカ、インディカ間でのMP3の配列タイプの割合

nは調査した品種数を示す。

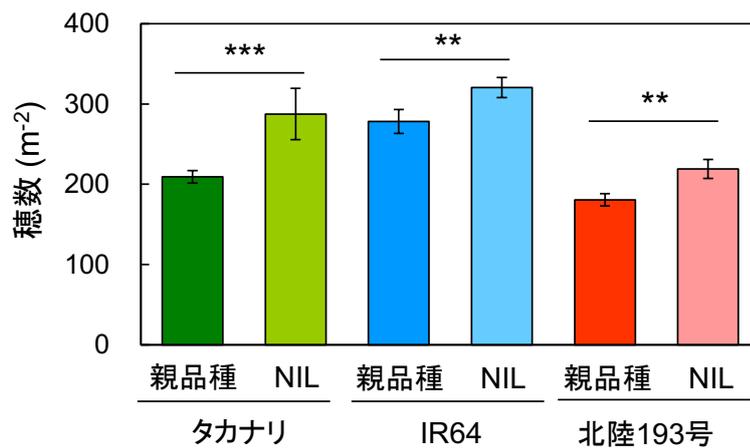


図3 タカナリ、IR64、北陸193号と各々の遺伝背景でコシヒカリ型MP3に入れ換えた準同質遺伝子系統(NIL)の穂数の比較

\*\*\*、\*\*は0.1%および1%水準で有意であることを示す。

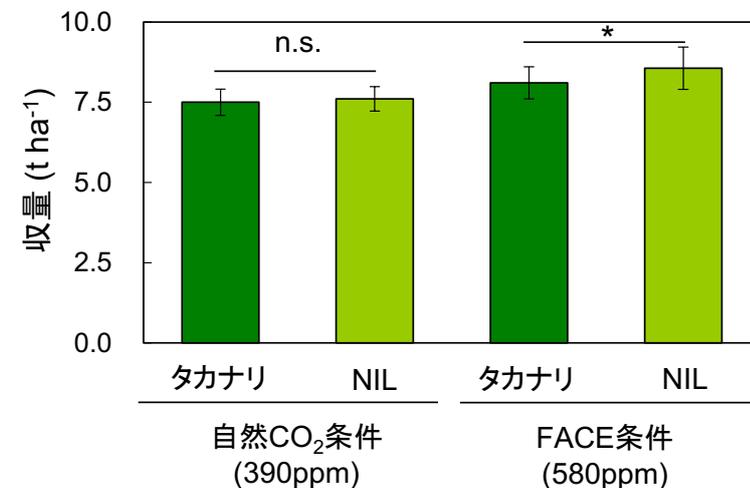


図4 自然CO<sub>2</sub>条件および開放系CO<sub>2</sub>増加条件(FACE)で栽培したタカナリとタカナリ背景NILの収量の比較

n.s.は有意差無し、\*は5%水準で有意であることを示す。

## ゲノム編集で *OsTB1* 遺伝子の機能を弱めたイネはリン欠乏条件での収量性が高い

イネの分げつ伸張抑制遺伝子 *TEOSINTE BRANCHED1* (*OsTB1*) の機能をゲノム編集により弱めることで、背景品種 X265 に比べて、分げつ数が 2 割増加した変異体が生産される。同変異体は、リン欠乏条件での籾収量が背景品種に比べて 4 割多い。*OsTB1* 遺伝子の機能を調整することで、分げつが抑制されるリン欠乏環境でのイネの生産性向上が期待される。

キーワード：イネ *TEOSINTE BRANCHED1* (*OsTB1*)、インフレーム変異、ゲノム編集、分げつ、リン欠乏

### 背景・ねらい

分げつはイネの草型や収量を決定する重要な形質である。多くの遺伝子が分げつ数の決定に関与しており、中でもイネの *TEOSINTE BRANCHED1* (*OsTB1*) は分げつ伸張を抑制する重要な遺伝子として知られている。一方、分げつ数に関与する重要な環境要因の一つとして、土壌栄養素であるリンが挙げられる。リン欠乏によるイネの分げつ発生の抑制は、リン欠乏土壌が広く分布するサブサハラアフリカにおいて、イネ生産の大きな制約となっている。本研究では *OsTB1* 遺伝子を標的としたゲノム編集を CRISPR/Cas9 システムを用いて行い、マダガスカル の主要水稻品種 X265 の変異体を生産する。同遺伝子の機能変化がイネの分げつ性およびリン欠乏条件での生産性に及ぼす影響を明らかにする。

### 成果の内容・特徴

1. CRISPR/Cas9 で作出された *OsTB1* 遺伝子の変異体 #29418 (30 bp 欠失) および変異体 #29430 (1 bp 挿入) の出穂直前の分げつ数は、それぞれ背景品種 X265 (WT) の 1.2 倍および 3.4 倍に増加する (図 1)。この分げつ数の増加は、#29418 においてはインフレーム変異\*による *OsTB1* の分げつ抑制機能の弱化、#29430 においてはフレームシフト変異\*\*による *OsTB1* の分げつ抑制機能の喪失によるものと考えられる。
2. #29418 (インフレーム変異体) における *OsTB1* 遺伝子の発現量は WT と同等である (図 2)。一方、*OsTB1* の下流遺伝子の一つである *OsGT1* 遺伝子の発現レベルは WT、#29418、#29430 (フレームシフト変異体) の順に高い (図 2)。このことは、*OsTB1* のフレームシフト変異による機能喪失、およびインフレーム変異による機能弱体化を支持する。
3. リン欠乏条件における #29418 の個体当たり籾収量は WT よりも多い (図 3A)。その差はリン施肥量が少ないほど大きく、リン施肥量 0 mg/kg の条件下での #29418 の個体当たり籾収量は WT よりおよそ 4 割多い (図 3A)。

4. #29418 の穂数、穎花数および稔実数は WT よりも多く、千粒重は WT よりも小さい (図 3B)。稔実数の増加量は千粒重の減少に対して相殺以上の効果を持つ。一方、#29430 の個体あたり稔実数は #29418 と同程度であり WT より多いが、千粒重の小ささに相殺され、個体あたり籾収量は WT と同等である (図 3AB)。

\* インフレーム変異：3 の倍数の塩基の欠失または挿入による遺伝子変異のことであり、翻訳の際、アミノ酸を指定する 3 塩基が構成する読み枠 (リーディングフレーム) は保存されるため、タンパク質の機能がある程度維持される場合がある。

\*\* フレームシフト変異：3 の倍数以外の塩基の欠失または挿入による遺伝子変異のことであり、アミノ酸を指定する読み枠がずれるため、通常、正常なタンパク質が合成されなくなり、機能が喪失する。

### 成果の活用面・留意点

1. *OsTB1* 遺伝子のゲノム編集による分げつ性改変は X265 以外の品種においても同様に実行できる。
2. 分げつ性の改変がリン欠乏条件における収量性向上に役立つことが期待できる。
3. 他の形質に関わる遺伝子を、ゲノム編集を用いて改変する場合においても、インフレーム変異により機能が弱体化し、表現型がマイルドになる可能性が考えられる。
4. 2023 年現在、インフレーム変異を意図的に誘発することはできないため、インフレーム変異体を獲得するためには複数の変異系統を生産し、選抜する必要がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [B5 アフリカ稲作システム (第 5 期)]、外部資金 [SATREPS]  
 研究実施期間：2018~2022 年度  
 研究担当者：石崎琢磨 (熱帯・島嶼研究拠点)、植田佳明、高井俊之、辻本泰弘 (生産環境・畜産領域)、圓山恭之進 (生物資源・利用領域)  
 発表論文等：Ishizaki et al. (2023) *Plant Science* 330: 111627  
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111627>

A	系統	標的サイトの塩基配列	挿入/欠失
	WT	CCGCTCACGGCCACAGCGACGGG	
	#29418	C-----	30 bp 欠失
	#29430	CCGCTCACGGCCACAGCTGACGGG	1 bp 挿入

図 1 ゲノム編集による *OsTB1* 変異体の作出

(A) 変異した *OsTB1* 遺伝子の塩基配列。WT は背景品種である X265。下線は Cas9 タンパク質に認識される PAM 配列。赤字は挿入された塩基。赤ダッシュは欠失した塩基。  
 (B) 出穂前の WT（左）、#29418（インフレーム変異体；中）、および #29430（フレームシフト変異体；右）。各系統の分けつ数の平均値をそれぞれの写真下部に記した。

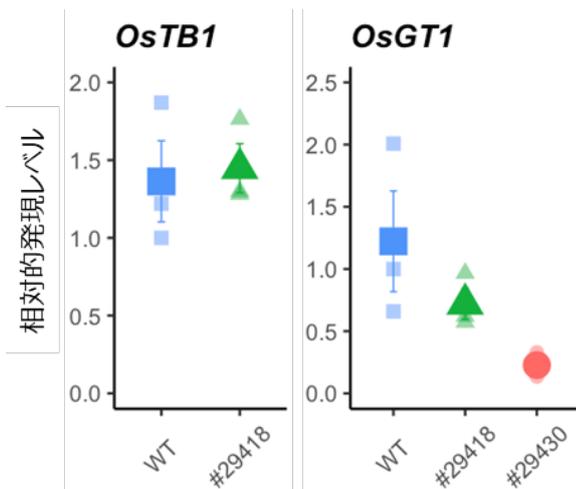


図 2 *OsTB1* 遺伝子および下流遺伝子である *OsGT1* 遺伝子の発現解析

播種後 21 日の植物体の基部から RNA を抽出し、遺伝子発現レベルを qRT-PCR により定量した。*OsTB1* は *OsGT1* 遺伝子のプロモーター領域に直接結合し、発現を誘導する。大きいシンボルは生物学的 3 反復の平均値、小さいシンボルはそれぞれの反復の値を示す。WT は X265、#29418 はインフレーム変異体、#29430 はフレームシフト変異体。

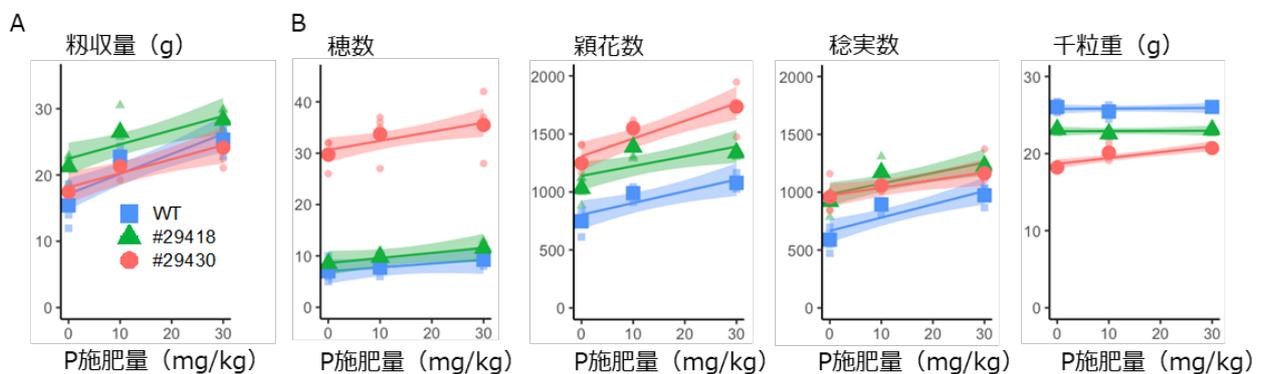


図 3 異なるリン施肥条件下で育成した *OsTB1* 変異体の個体当たりの収量および収量構成要素

#29418（インフレーム変異体）、#29430（フレームシフト変異体）、および WT（X265）を 0、10、または 30 mg/kg のリン施肥条件下で成熟期まで育成した。(A) 個体当たり収量。(B) 収量構成要素。大きいシンボルは 4 反復の平均値、小さいシンボルはそれぞれの反復の値を示す。ANCOVA による推定モデルおよび 95%信頼区間をそれぞれ直線およびシェードで示す。

図は Ishizaki et al. (2023) © The Author(s) 2023 より転載/改変して作成

## 含水比に基づくリン施肥診断に有効な水田土壌のリン吸着能の簡易推定法

リン肥料の施肥効率にかかわる水田土壌のリン吸着能は、密閉容器内で飽和食塩水（飽和塩化ナトリウム水溶液）とともに1週間静置した土壌の含水比によって高い精度と再現性で推定できる。危険な試薬や高価な機器を要する化学分析を必要としないため、分析環境が十分に整わないサブサハラアフリカなどにおいても、リン肥料を優先的に施用する圃場を選別するために利用できる。

キーワード：土壌診断、施肥管理、土壌水分、リン吸着能

### 背景・ねらい

土壌はリンを吸着する性質（リン吸着能）をもち、リン吸着能が高い場合には、リン肥料の施用効果が得られにくい。特に、土壌中のリン含量が低く、農家の肥料投入量も少ないサブサハラアフリカの農地では、限られたリン肥料を効果的に施用して作物増収に繋げることが重要であるが、土壌のリン吸着能は近接する圃場間でも大きく変動しうするため、その把握が不可欠である（令和3年度国際農林水産業研究成果情報 B09「リン欠乏水田でのリン施肥による水稻増収量は土壌リン吸着能から推定できる」）。しかし、一般的な土壌のリン吸着能の分析\*には、危険な試薬や高価な機器を要するため、分析環境の整備が不十分なサブサハラアフリカの研究機関等で広く実施することは難しい。国際農研では、主に中性～酸性土壌において、土壌のリン吸着能を規定する活性アルミニウム含量と風乾させた土壌の含水比との間に相関があることを見出したが、風乾時の湿度の変化により含水比が安定しないことが課題であった。本研究では、土壌の含水比を調整するための調湿材として飽和食塩水を活用することにより、高い精度と再現性で、土壌のリン吸着能を平易に推定できる手法を開発する。

\*土壌のリン吸着能は、土壌とリン溶液(1,000 ppm P)を土液比1:5で24時間振とうした後、土壌に吸着したリン量を危険性の高い硝酸や毒性があるモリブデンを含む試薬によって発色させて分光光度計によって定量し、もとのリン溶液中のリン量に対する土壌に吸着したリン量の割合として算出する。

### 成果の内容・特徴

1. 貧栄養な酸性土壌や肥沃度の高い火山灰性土壌など幅広い性質を含むマダガスカルの水田表層土壌306点について、土壌の含水比によって、10.1%から96.1%の大きな変異をもつ土壌のリン吸着能を高い精度で推定できる（図1）。
2. 土壌の含水比は、次のように算出する。まず、デシケ

1. ターなどの密閉容器内において、風乾細土(< 2 mm)を飽和食塩水とともに室温で一週間静置した後の重量を測定する。次いで、絶乾(105°Cで24時間乾燥)した後の重量も測定し、これらの重量の差を、絶乾後の重量で割り、土壌の含水比を算出する（図2）。
3. 土壌を静置するための密閉容器内に調湿剤として飽和食塩水（水100gに対して塩化ナトリウムを36g以上溶かしたもの）を入れることで、静置前の乾燥程度の違いや密閉容器外の相対湿度に関わらず、高い再現性で土壌の含水比を計測できる（図3）。

### 成果の活用面・留意点

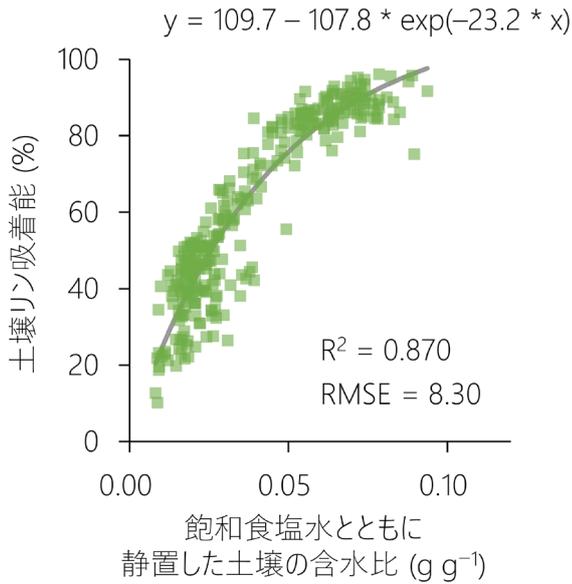
1. 農業技術普及員などが、化学分析を経ずに、施肥効果が得られやすい低いリン吸着能を持つ圃場を選別し、優先的にリン肥料を施用するなど、施肥設計に利用できる。
2. 本成果は、リン吸着能が高い火山灰土壌や貧栄養な酸性土壌など、熱帯・亜熱帯地域に分布する一般的な水田土壌に対して適用可能である。ただし、土壌のpHが高く、交換性陽イオン含量の高いアルカリ性土壌では誤差が大きくなることが懸念されるため、その適用可能性については追加の検証が必要である。

### その他

予算区分：外部資金 [SATREPS]

研究実施期間：2017～2022年度

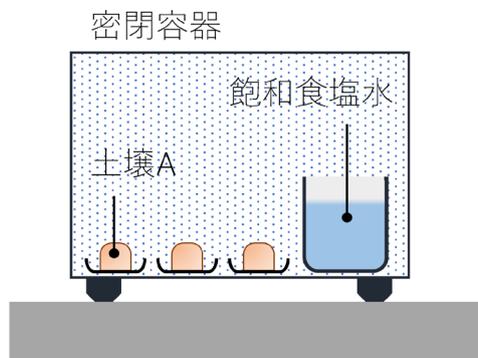
研究担当者：西垣智弘、辻本泰弘（生産環境・畜産領域）、Rakotonindrina, H., Andriamananjara, A.（アンタナナリボ大）  
発表論文等：Nishigaki et al. (2023) *Soil Science and Plant Nutrition* 69: 337–345. <https://doi.org/10.1080/00380768.2023.2245420>



**図1 飽和食塩水とともに静置した土壌の含水比と土壌リン吸着能の関係**

R<sup>2</sup>: 決定係数。予測値が実測値とどのくらい一致しているかを表す指標で、値が1に近いほど精度が高い。

RMSE: 二乗平均平方根誤差。予測値と実測値の差を表す指標で、値が小さいほど誤差の小さいモデルであることを示す。

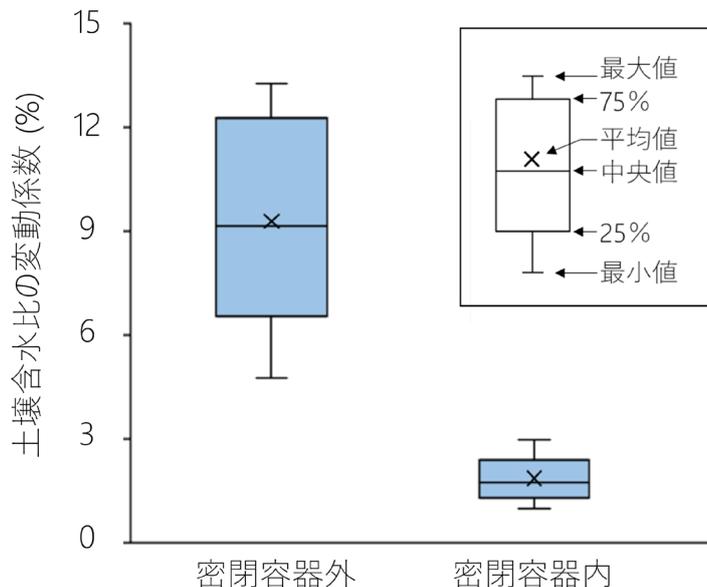


土壌Aの含水比 (g g<sup>-1</sup>)

$$= \frac{\text{飽和食塩水とともに静置した後の土壌Aの重量 (g)} - \text{絶乾した後の土壌Aの重量 (g)}}{\text{絶乾した後の土壌Aの重量 (g)}}$$

**図2 密閉容器内で飽和食塩水とともに土壌を静置する様子と土壌の含水比の算出式**

調湿剤として飽和食塩水（飽和塩化ナトリウム水溶液）を使用する。塩化ナトリウムの飽和水溶液は、室温の範囲内であれば、温度の影響をほとんど受けずに相対湿度をほぼ一定に保つことが知られている。コップ一杯分の土壌（約 200 g）を用いる場合には、0.1 g まで計測できる電子天秤を用いて重量を計測する。



**図3 異なる相対湿度条件下で様々な土壌を密閉容器外および内において静置した後の土壌含水比の変動係数**

様々な土壌（n = 20、リン吸着能 19.6–94.1%）を、相対湿度 41%、52%、64%（気温はいずれも 20°C）においてそれぞれ密閉容器外および内に一週間静置した後の土壌含水比の変動係数の箱ひげ図。密閉容器外で土壌を静置すると、乾燥時の相対湿度の影響を受けて土壌含水比の変動係数は高くなる。一方で、密閉容器内で飽和食塩水とともに土壌を静置すると、密閉容器外の相対湿度に対する土壌含水比の変動係数は低い。

図は Nishigaki et al. (2023) © Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition 2023 より転載/改変して作成（転載/改変許諾済み）

## 水稲へのリン浸漬処理 P-dipping は冠水害の回避にも有効

リン欠乏水田で高い施肥効果を発揮するリン浸漬処理 P-dipping は、水稲の生育日数を短縮して低温ストレスリスクを軽減するだけでなく、初期生育を改善するため、突発的な水位上昇にともなう冠水害の回避にも有効である。さらに、P-dipping と組み合わせることで、窒素施肥の効果が大きくなることから、P-dipping は様々な圃場環境や窒素施肥に効果的な技術である。

キーワード：イネ、P-dipping、冠水害、窒素施肥、マダガスカル

### 背景・ねらい

サブサハラアフリカの水田の多くは天水田に分類され、冠水や干ばつ、低温や高温など、様々な環境ストレスを受けやすい。加えて、土壌や肥料から供給される窒素、リンなどの養分が少ないため、水稲の生産性が著しく制限されている。水稲へのリン施肥技術 P-dipping は、リン欠乏水田で高い施肥効果を発揮することや、移植から収穫までの生育日数を短縮し、生育後半の気温低下にともなう登熟不良、すなわち、低温ストレスの回避に有効なことが分かっている（令和 2 年度国際農林水産業研究成果情報 B02「移植苗のリン浸漬処理はイネの施肥効率を改善し低温ストレスを回避する」）。一方で、冠水害\*や窒素不足など、様々な条件をもつ農家圃場において、同技術がどの程度の増収効果をもつかについては、情報が限られる。そこで本研究では、マダガスカル中央高地で標高が異なる 2 つの地域（標高が約 1,200m の温暖地域と 1,400m の冷涼地域）から計 18 地点の農家圃場を選定し、P-dipping の標準的な効果を検証するとともに、様々な圃場環境や窒素施肥法の違いが同技術の効果に及ぼす影響を明らかにする。

\*急激な田面水の上昇により、稲株の大半、もしくは全てが浸水することで呼吸や光合成が妨げられ、生育の阻害や枯死が生じる現象。

### 成果の内容・特徴

1. P-dipping を施すことで、18 地点の農家圃場におけるヘクタール当りの平均収量は、リン肥料なしと比べて 1.1 トン、同量のリン肥料を従来の表層施肥で与えた場合に比べて 0.5 トン増加する（図 1A）。
2. P-dipping と組み合わせることで窒素施肥の効果が大きくなる。窒素施肥によるヘクタール当りの平均増収量は、リン肥料なしで 0.5 トン、リン表層施肥で 0.9 トン、P-dipping で 1.3 トンとなる（図 1B）。
3. P-dipping は、初期生育（移植 60 日後の地上部乾物重）を大幅に改善するため、突発的な水位上昇にともなう冠水害を回避できる（図 2）。
4. 地域、移植時期、冠水害の有無、土壌特性など、

様々な圃場環境要因について、P-dipping による増収効果（リン肥料なしとの収量差）に及ぼす影響を重回帰モデルで解析した結果、冷涼地域や温暖地域でも移植日が遅いなど、低温ストレスを受けやすい圃場環境に加えて、生育初期に冠水害を受けた圃場で、P-dipping による増収効果が大きくなる。重回帰モデルの偏回帰係数\*\*から、生育初期に冠水害を受けた圃場では、受けなかった圃場に比べて、P-dipping による増収効果は、ヘクタール当たり 0.94 トン高い傾向をもつ（図 3）。

\*\*複数の要因が特定の結果にどのように影響するかを理解する重回帰モデルにおいて、それぞれの圃場環境要因が、他の要因に独立して、どの程度、P-dipping による増収効果に影響を与えているかを示す数値（t ha<sup>-1</sup>）。

### 成果の活用面・留意点

1. 土壌のリン欠乏だけではなく、登熟期の低温ストレスや生育初期の冠水害など複合的なストレスが生じる圃場環境において同技術が利用できる。
2. リンと窒素の両方が欠乏する圃場では、P-dipping と窒素追肥の組合せで収量と施肥効率を改善できる。
3. 本成果は、マダガスカル中央高地にみられる様々な栽培環境での結果に基づくものである。その他の地域への適用については、追加検証が望ましい。

### その他

予算区分：交付金プロ [B5 アフリカ稲作システム（第 5 期）]、外部資金 [SATREPS]

研究実施期間：2017～2023 年度

研究担当者：アウンゾーウー、辻本泰弘（生産環境・畜産領域）、Rakotoarisoa, N.M.（マダガスカル国立農村開発応用研究センター）、Andrianary, B.H.（アンタナナリボ大学放射線研究所）

発表論文等：Oo et al. (2023) Localized phosphorus application via P-dipping doubles applied P use efficiency and avoids weather-induced stresses for rice production on P-deficient lowlands. *European Journal of Agronomy* 149: 126901. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126901>

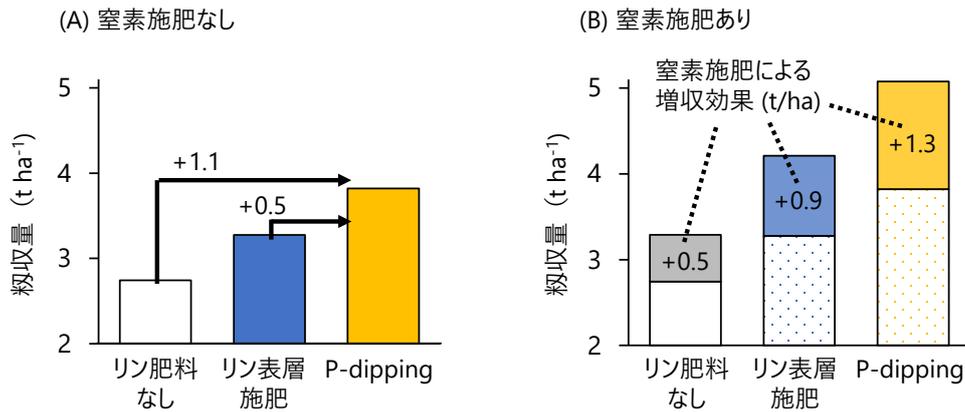


図 1 異なる窒素施肥条件において P-dipping で得られる水稻の増収効果の比較

18 農家圃場で観測された平均値を示す。リン表層施肥と P-dipping は、いずれもヘクタール当り 13 kg のリン肥料を重過リン酸石灰で移植時に施用した。窒素施肥ありは、ヘクタール当り計 60 kg の窒素を硫酸アンモニウムで移植後 21 日目と 60 日目に施用した。処理間の平均値は、いずれも Tukey の多重比較検定により  $P < 0.05$  で有意。

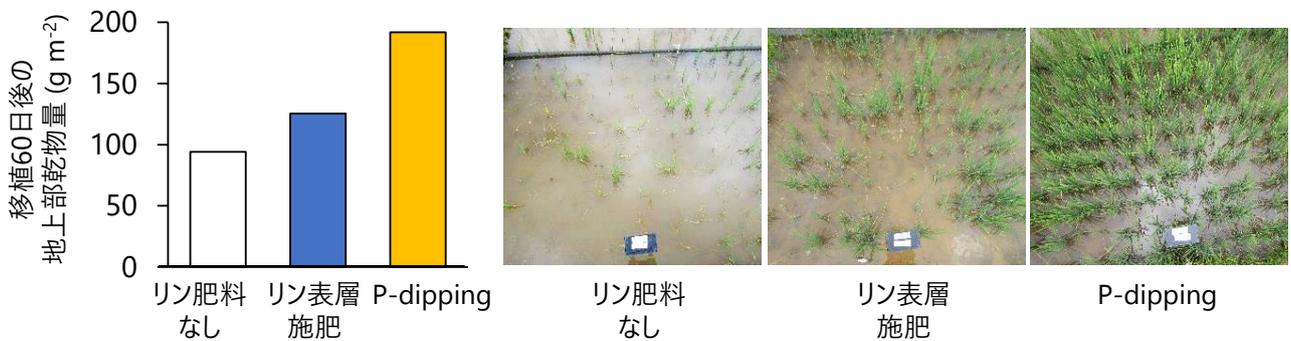


図 2 P-dipping が移植 60 日後の地上部乾物重と水位上昇時の冠水程度に及ぼす効果

地上部乾物重は 18 農家圃場で観測された平均値（窒素施肥ありなしの両処理区を含む）。処理間の平均値は、いずれも Tukey の多重比較検定により  $P < 0.05$  で有意。3 枚の写真は、同一圃場内の隣接する処理区で同じ日に撮影。

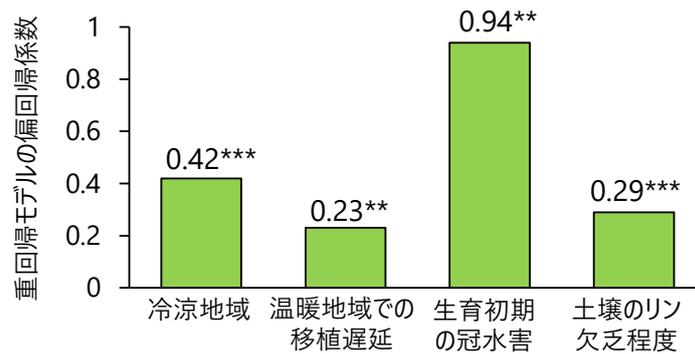


図 3 P-dipping による増収効果の違いを説明する重回帰モデルの圃場環境要因とその偏回帰係数

\*\* $P < 0.01$ , \*\*\* $P < 0.001$  で有意。「温暖地域での移植遅延」は、通常より、約 1 ヶ月移植日が遅く、低温指数（出穂日 15 日前から 7 日後までの期間に日平均気温が  $22^{\circ}\text{C}$  を下回った数値の積算値）が 10 を超えた圃場。「生育初期の冠水害あり」は、毎週撮影した群落画像をもとに、移植から移植 60 日後頃までの期間に、田面水の上昇による稲株の一部ないし全部が冠水し、その後の欠株が顕著に観察された圃場。「土壌のリン欠乏程度」は、各圃場がもつ土壌特性値の主成分分析によって、Brayll リン含量やシウ酸塩抽出リン含量など、土壌のリン特性に関わる要素からなる主成分の主成分得点のこと。これらを説明変数として、P-dipping による増収程度 ( $\text{t ha}^{-1}$ ) の圃場間差に対する重回帰モデルを構築した。モデルの自由度調整済み決定係数は 0.89。

## 水稲へのリン浸漬処理 P-dipping は 4.5~6.5 葉程度の苗を用いると増収効果が高い

水稲の移植時に、リン肥料を混ぜた泥を苗の根に付着させるリン浸漬処理 P-dipping では、葉齢が 4.5~6.5 葉程度の苗を用いることで、最も高い増収効果が得られる。葉齢が 4.5 程度より小さい場合には苗の根に付着するリン量が少なく、6.5 程度より大きい場合には肥料焼けにもなる苗の植え傷みが生じることで、P-dipping による増収効果が低くなる。

キーワード：イネ、P-dipping、根量、肥料焼け、マダガスカル

### 背景・ねらい

国際農研が開発したリン浸漬処理 P-dipping は、マダガスカルの稲作農家への普及が進む有望技術である（令和2年度国際農林水産業研究成果情報 B02「移植苗のリン浸漬処理はイネの施肥効率を改善し低温ストレスを回避する」）。同技術では、水稲の移植時に、リン肥料（重過リン酸石灰）を混ぜた「泥」を苗の根に付着させる。そのため、苗の根が発達するほど、「泥」の付着量、すなわち、移植時に株元に施用されるリン量は多くなる。一方で、育苗期間が長すぎる場合には、苗の質が低下し、肥料焼けにもなる苗の植え傷みのリスクが大きくなる可能性がある。現地の農家が P-dipping を実践する上で、植え傷みのリスクを回避し、施肥効果の高い苗を使用することが重要である。そこで本研究では、葉齢\*の異なる苗を用いて、P-dipping による「泥」の付着量や初期の生育改善効果、さらに、農家圃場での増収効果を調査し、同技術に最適な苗の特性を明らかにする。

\*主茎に展開した葉の数（不完全葉を含む）のこと。イネの生育ステージを示す指標。

### 成果の内容・特徴

1. 昼/夜温 25/15°C、照度 20,000 lx の人工気象器で育苗したイネ品種 X265 の苗の根重は、葉齢が大きくなるほど直線的に増加する。一方で、根に付着する「泥」の量は、葉齢に対して S 字型の増加を示す。葉齢 4.5~6.5 葉程度の範囲で、「泥」の付着量、すなわち、リン施用量は大きく増加する（図 1）。
2. P-dipping による移植 30 日後の地上部乾物重の増加量は、苗の葉齢が 6.5 葉程度になるまで、「泥」の付着量とともに大きくなる。ただし、6.5 葉程度より大きい苗では、乾物増加量は減少する。人工気象器内で 8 葉程度まで無施肥で育苗すると、苗質が顕著に低下し、移植後の植え傷みにより、稲株が枯死する（図 2）。

3. マダガスカル中央高地に分布する 90 地点の農家圃場（標高 1,300~1,945 m、育苗期間中の日平均気温 17.5~21.9°C）での検証から、葉齢が 4.5~6.5 葉程度の苗（各圃場で農家が任意に選んだ X265 を含む 15 品種）が用いられた圃場で、P-dipping による平均の増収量がヘクタール当たり 1.0 トンで最も大きくなる。葉齢が 4.5 葉程度より小さい、もしくは、6.5 葉程度より大きい苗が用いられた圃場では、P-dipping による平均の増収量は、ヘクタール当たり 0.6 トン、もしくは 0.7 トンである（表 1）。

4. 以上より、P-dipping には、4.5~6.5 葉程度の苗を用いることが推奨される。苗がより小さい場合、根に付着するリン肥料の量が少なくなる。逆に、育苗日数が長く苗質が低下した場合には、肥料焼けをとともう植え傷みのリスクが大きくなる（図 3）。

### 成果の活用面・留意点

1. 農家や普及員が P-dipping を実践する際に、その技術効果を高める適正な苗の選択に利用できる。
2. 苗の質や根量は、葉齢だけではなく、育苗条件（播種量、温度、水管理、光強度、苗床の土壌特性や施肥管理など）や品種によっても影響を受ける。

### その他

予算区分：交付金プロ [B5 アフリカ稲作システム（第 5 期）]、外部資金 [SATREPS]

研究実施期間：2017~2023 年度

研究担当者：辻本泰弘、アウンゾーウー（生産環境・畜産）、Rakotoarisoa, N.M.（マダガスカル国立農村開発応用研究センター）、田代亨、仲田麻奈、江原宏（名古屋大学農学国際教育研究センター）

発表論文等：Rakotoarisoa et al. (2023) *Crop and Environment* 149: 126901. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2023.10.002>



## 有効土層の薄い土壤型プリンソルにおけるソルガムの特異な施肥応答

西アフリカには作物が根を張れる土層（有効土層）の厚さが50 cm以下で、水分保持能が低いプリンソルと呼ばれる特殊な土壤が広く分布する。このプリンソルでは、他の土壤型とは異なり、土壤水分の不足が主穀であるソルガムの収量を制限しており、さらに、最適な施肥量も有効土層が25 cmのプリンソルでは他の土壤型と異なる。現在西アフリカで再整備が進んでいるソルガムの栽培指針において、プリンソルとそれ以外の土壤型を区別する必要がある。

キーワード：西アフリカ、半乾燥地、ソルガム、有効土層、プリンソル

### 背景・ねらい

サブサハラアフリカ（SSA）で急激に増加する食料需要を満たすためには、SSAでの農業生産性の向上が不可欠である。国連食糧農業機関の統計によれば、1980年から2020年にかけて当該地域の人口は3倍に増加しているのに対して、SSAの半乾燥地の主穀であるソルガムの単位面積当たりの生産性は20%しか増加しておらず、依然として低迷している。この問題に対処するため、現在、西アフリカでは栽培指針の再整備が進んでいるが、気候を反映した農業生態区分は考慮されているものの、土壤型の違いは考慮されていない。しかし、西アフリカの半乾燥地には作物が根を張れる土層（有効土層）の厚さが50 cm以下と薄い、プリンソルと呼ばれる特殊な土壤が広く分布している。この土壤は、他の土壤型に比べて水分保持能が低いため、プリンソル上ではソルガムの施肥応答が他の土壤型とは異なる可能性がある。

そこで本研究では、西アフリカの半乾燥地で分布面積が広い3つの土壤型、すなわち有効土層が約100 cmと厚く水分保持能が高いキシソル（LX）、有効土層が約50 cmのプリンソル（PT）、有効土層が約25 cmのプリンソル（PX）において、ソルガムの施肥応答の違いを明らかにする。

### 成果の内容・特徴

- 降水量が平均年より21%（標準偏差の1.3倍）少ない年に、有効土層が100 cmのLXでは収量の低下は認められないものの、有効土層が50 cmのPTや25 cmのPXでは、収量が低下する（図1、表1）。これは、いずれのプリンソルでも土壤水分の不足が収量を制限しうることを示しており、プリンソルでは、最適なソルガムの品種（例：より早生）や播種密度（例：より疎植）がキシソルとは異なる可能性を示唆している。
- ブルキナファソで現在ソルガムに対して推奨されている窒素施用量（37 kg/ha）、その倍量（74 kg/ha）、3倍量（111 kg/ha）で施肥をする場合、有効土層が100 cmのLXや50 cmのPTでは74 kg/haまでソルガムの収量が増加するのに対して、有効土層が25 cmのPXでは

37 kg/haでソルガムの収量が頭打ちになる。この原因は、有効土層が非常に薄いPXでは貯水量が少なく、施肥でソルガムの生育が旺盛になることに伴い増加する水要求量に応えられないためと考えられる。

- 以上のようにソルガムの施肥応答はLX、PT、PX間で大きく異なることから、西アフリカで現在再整備が進んでいる栽培指針においては、LX、PT、PXを区別し、最適な施肥量、品種、播種密度を検討する必要がある。

### 成果の活用面・留意点

- 本報を基に、現在、西アフリカの各国で再整備が進められている栽培指針で土壤型を考慮することにより、農家が施肥効率を最大化できるテーラーメイドの栽培指針の開発に道が開かれる。
- 西アフリカの半乾燥地では、地中レーダーにより簡単に土壤型を把握できる（平成30年度国際農林水産業研究成果情報 A04「スーダンサバンナでは地中レーダーで鉄石固結層の出現深度を測定できる」）。

### その他

予算区分：交付金プロ [B6 アフリカ畑作システム（第5期）、A2 アフリカ流域管理（第4期）]

研究実施期間：2016～2023年度

研究担当者：伊ヶ崎健大、南雲不二男（生産環境・畜産領域）、Simpore, S., Barro, A.（ブルキナファソ環境農業研究所）  
発表論文等：

1) Ikazaki et al. (2023) *Soil Science and Plant Nutrition* 70(2): 114–122. <https://doi.org/10.1080/00380768.2023.2279582>

2) Iseki et al. (2021) *Field Crop Research* 261: 108012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108012>

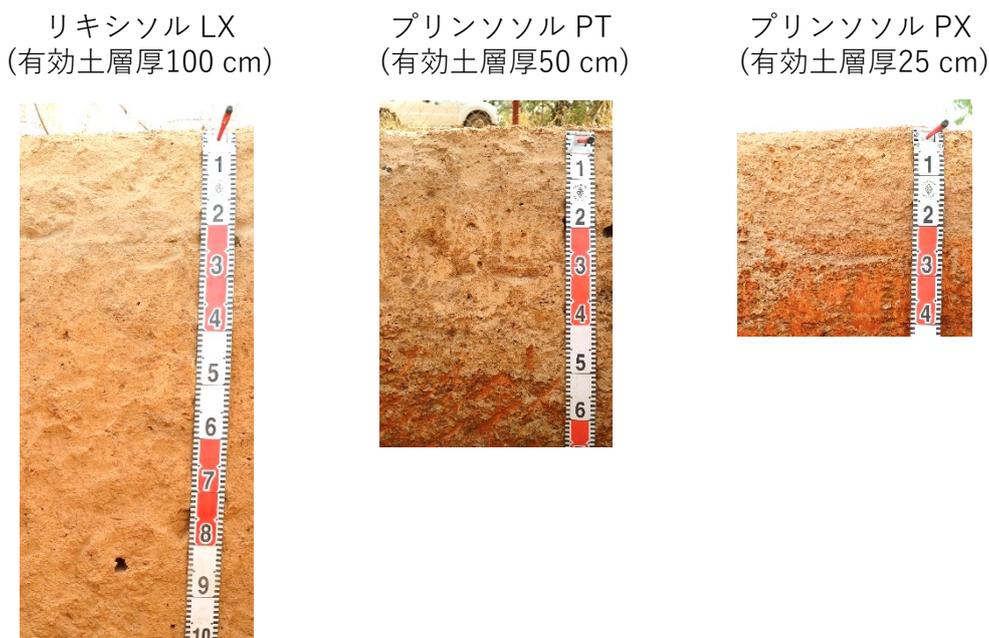


図1 西アフリカの半乾燥地で分布面積が広い3つの土壌型の土壌断面写真

PTとPXでは鉄石固結層と呼ばれる作物の根の伸長を許さない硬い層がそれぞれ深さ約50cm、25cm付近に出現するため、ソルガムは鉄石固結層より上の土層の水分しか利用することができない。

表1 それぞれの土壌型において水分環境および施肥条件がソルガムの収量(kg/ha)に及ぼす影響

	土壌型		
	リキシソル LX (有効土層厚100 cm)	プリンソソル PT (有効土層厚50 cm)	プリンソソル PX (有効土層厚25 cm)
A: 降水量の多寡	ns <sup>1)</sup>	*	**
B: 窒素施用量 <sup>2)</sup>			
0 kg/ha	522 (52)c	325 (60)c	287 (71)b
37 kg/ha	1040 (121)b	520 (144)bc	800 (79)a
74 kg/ha	1534 (120)a	971 (107)a	808 (105)a
111 kg/ha	1596 (142)a	784 (101)ab	780 (116)a

西アフリカの半乾燥地を代表する地質、地形、土壌が分布するブルキナファソ中部での2年間（平均年と少雨年）の試験結果。1) 統計解析結果。ns: 有意ではない (p>0.05)、\* p <0.05、\*\* p <0.01。括弧内の数字は標準誤差。異なるアルファベットは同じ土壌型の中で、ソルガムの収量が窒素施用量の違いで有意に異なることを示す(p<0.05)。2) 窒素施用の処理区では、同時にリン (23 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) とカリウム (14 kg K<sub>2</sub>O/ha) も施用されている。

図1は Iseki et al. (2021) © The Author(s) 2020、表1は Ikazaki et al. (2023) © The Author(s) 2023、それぞれより転載/改変して作成

## 土壌型プリンソルにおけるササゲ栽培では施肥と密植による増収効果が高い

西アフリカのスーダンサバンナでは 2 つの土壌型（リキシソルとプリンソル）の圃場が農家内で混在することが多い。プリンソルは低肥沃であるが、施肥や密植によるササゲの増収効果がリキシソルよりも高く、両者を組み合わせるとより効果が高い。施肥を元肥と追肥に分けた場合、同量を元肥のみで施用する場合よりも収量が増加する。農家内で土壌が混在する場合、プリンソルへ施肥や密植を優先することで総収穫量の増加が見込める。

キーワード：西アフリカ、スーダンサバンナ、ササゲ、播種密度、施肥

### 背景・ねらい

マメ科作物のササゲは乾燥に強いことから、雨の少ない西アフリカ内陸部の半乾燥地（スーダンサバンナ）で広く栽培されている。ササゲは現地に暮らす人々の重要なタンパク質供給源であるが、土の養分量が少ないために、面積あたりの収穫量はアジアや米国のおよそ 4 分の 1 以下である。

養分量の少ない土壌で収穫量を増やす最もシンプルな方法は施肥である。しかし、肥料価格が高いことに加え、施肥をしても期待するほど収穫が増えないため、一般的な農家はササゲ栽培でほとんど肥料を使用しない。また、少ない養分に起因する低成長を補うため、播種密度を高めることも対策として考えられるが、現地では 50 年以上前に設定された推奨播種密度が未だに改訂されずに使用されている。

スーダンサバンナに優占する 2 つの土壌型のうち、リキシソルは相対的に肥沃で保水性が高い一方、降雨直後に土壌表層の気相率\*が低下しやすいため、降雨直後には酸素不足による過湿害を受けやすい。プリンソルは肥沃度や保水性が低く、降雨による肥料流亡のリスクが高い。養分量や保水性が異なる 2 つの土壌について、施肥や密植の効果を両者の比較により明らかにし、同地域の重要作物であるササゲの収量を増加させる栽培管理を検討する。

\* 気相率：土壌の全容積に対する空気容積の比率

### 成果の内容・特徴

1. 収量に対する施肥の効果はプリンソルでリキシソルよりも平均して約 1.4 倍高い（図 1）。この違いは、保水性の高いリキシソルにおいて、降雨後に気相率が一時的に著しく低下し、高い地温と相まって根圏の酸素不足が生じるためと考えられる（図 2）。これが繰り返される結果、根の発育が阻害される。

2. 無施肥の場合、播種密度を推奨法の 2 倍の密植とすると、プリンソルでは平均 1.5 倍程度の収量増収効果がある。リキシソルでは収量増加効果は小さい（図 1）。2 つの土壌型とも、施肥と密植を組み合わせた場合、施肥単体よりも収量増加が見込める（図 1）。

3. 2 つの土壌型とも、施肥を元肥と追肥の 2 回に分ける場合、全量を元肥で施用する場合よりも収量増加を見込むことができる（図 1）。

### 成果の活用面・留意点

1. 土壌型は数百メートルの範囲内で変化する。農家内でも圃場の土壌型によって施肥量や播種密度を変えることで効率的にササゲ収量を改善することができる。

2. 追肥の時期は地上部の繁茂期にあたる播種後 4 週目が望ましいが、スーダンサバンナでは雨季中の最も雨が多い時期に相当するため、追肥直後に激しい降雨があった場合、肥料の流亡により追肥効果が得られなくなるリスクがある。肥料流亡のリスクは保水性の低いプリンソルでより大きい。

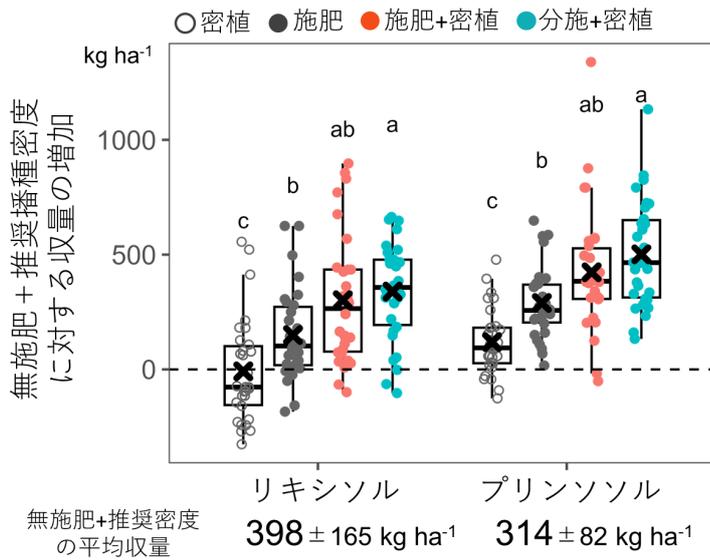
### その他

予算区分：交付金 [B6 アフリカ畑作システム（第 5 期）、B1 アフリカ食料（第 4 期）]

研究実施期間：2018～2023 年度

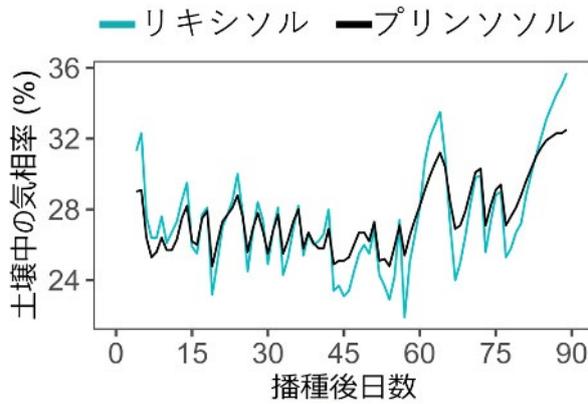
研究担当者：井関洸太郎（生物資源・利用領域）、伊ヶ崎健大（生産環境・畜産領域）、Batiemo, B.J.（ブルキナファソ環境農業研究所）

発表論文等：Iseki et al. (2023) *Field Crops Research* 292: 108825. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108825>



**図 1 スーダンサバンナの優占土壌型における施肥と播種密度がササゲ収量に及ぼす効果**

ブルキナファソ中央部においてササゲ3品種を2018年～2019年の2年間栽培した結果。各処理区において2年、3品種、5反復（n=30）のバラつきを示す。異なるアルファベットは平均値が5%水準で有意に異なることを示す。×印は平均値を示す。



**図 2 ササゲ生育期間中の土壌中の気相率の変化（上）と各土壌型におけるササゲの根の発達の様子（下）**

（上）リキシソルはプリンソソルよりも降雨直後に土壌表層の気相率が低下しやすいため、降雨直後には酸素不足による過湿害を受けやすい。（下）リキシソルで生育したササゲは根粒の着生がほとんどみられず、プリンソソルの個体よりも根の発達が貧弱である。写真は各土壌型の圃場で生育したササゲの播種後4週目の様子。



図は Iseki et al. (2023) © Author(s) 2023 より転載/改変して作成

## スーダンサバナの栽培データを用いて気候変動がササゲ栽培に及ぼす影響を推定

西アフリカのスーダンサバナにおける詳細な栽培データを基にしたササゲの収量予測では、気候変動により今後 30 年間で降雨量が増すため、保水性の高い土壌（リキシソル）では多雨年にササゲの過湿害が深刻化する。一方、保水性の低い土壌（プリンソル）では、引き続き干ばつが主な収量低下リスクとなる。半乾燥地であっても土壌型に応じて、干ばつだけでなく過湿害への対策が必要である。

キーワード：気候変動、収量予測、干ばつ、過湿害、土壌型

### 背景・ねらい

アフリカ西部のスーダンサバナと呼ばれる半乾燥地域では、乾燥に強いマメ科作物のササゲが広く栽培されている。しかし、単位面積当たりの収量は極めて低いうえ、今後、豪雨や干ばつなど、気候変動による極端気象の影響が顕在化することが懸念されている。ササゲは当地域における重要なタンパク質供給源として、将来の生産変動の予測やその要因の特定など、気候変動への対策が急務となっている。

収量予測モデルは雨量や気温などの気象情報と土の肥沃度や水分保持に関する情報を入力することで目的的環境条件における作物の収量を推定することができる。しかし、ササゲを対象とした既存のモデルは、環境ストレスが少ない好適な栽培環境における収量予測に特化しているため、アフリカの厳しい栽培環境に適用することが難しい。

そこで、国際農研の過去の研究で蓄積されたスーダンサバナにおけるササゲ栽培データを用いて既存モデルの収量予測精度を改善し、同地域における今世紀半ばまでのササゲ収量に対する気候変動の影響を評価する。

### 成果の内容・特徴

1. 当該地域を代表する 2 種類の土壌型リキシソルとプリンソルを対象に、降雨条件が異なる 4 年間における 20 品種のササゲ栽培データ（n=1380）をもとに収量予測モデルを作成することで、乾燥条件や過湿条件（図 1）など、幅広い栽培環境における収量推定を行うことができる。
2. 収量予測に用いた最新の全地球的な気候変動予測（第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト、CMIP6）では、西アフリカにおいて今後 30 年間でササゲ栽培期間（7～10 月）における降雨量および日 30mm 以上の強雨日数が増加する（図 2 上）。降雨が多く、強雨日数が増加するとリキシソルのササゲ収量が大きく低下する（図 2 下）。
3. 将来、干ばつ発生時のササゲの収量低下は、土壌型によらず現在より軽減されるが、プリンソルでは干ばつによる収量低下が引き続き最も深刻である（図 3）。

一方、リキシソルでは、多雨年における過湿害が現在よりも深刻化すると推定される。

### 成果の活用面・留意点

1. リキシソルは比較的肥沃で収量が高いため、主要な作物生産の場となっているが、ササゲにおいては今後、雨量増加による過湿害が深刻化すると予想されることから、過湿害に強い品種の導入などの対策が必要である。
2. プリンソルでは過湿害よりも干ばつによる収量低下が相対的に大きく、今後も干ばつへの対策を中心に生産の安定化を図る必要がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [B6 アフリカ畑作システム（第 5 期）、B1 アフリカ食料（第 4 期）]

研究実施期間：2016～2023 年度

研究担当者：井関洸太郎（生物資源・利用領域）、伊ヶ崎健大（生産環境・畜産領域）、酒井徹（社会科学領域）、飯泉仁之直（農研機構）、塩竈秀夫（国立環境研究所）、今田由紀子（東京大学）、Batieno, B.J.（ブルキナファソ環境農業研究所）

発表論文等：Iizumi et al. (2023) *Agricultural and Forest Meteorology* 344: 109783. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109783>



リキシソル（2016年 播種1ヵ月後） プリンソソル（2017年 収穫前）

図1 スーダンサバンナに優占する2つの土壌型におけるササゲ栽培の様子

西アフリカ全域に広く分布する2つの土壌型（リキシソル、プリンソソル）において、現地のササゲ20品種を4年間（2016～2019年）栽培した。リキシソル（左）は降雨直後に過湿害が生じやすく、プリンソソル（右）は短期的な降雨停止により干ばつが生じやすい。

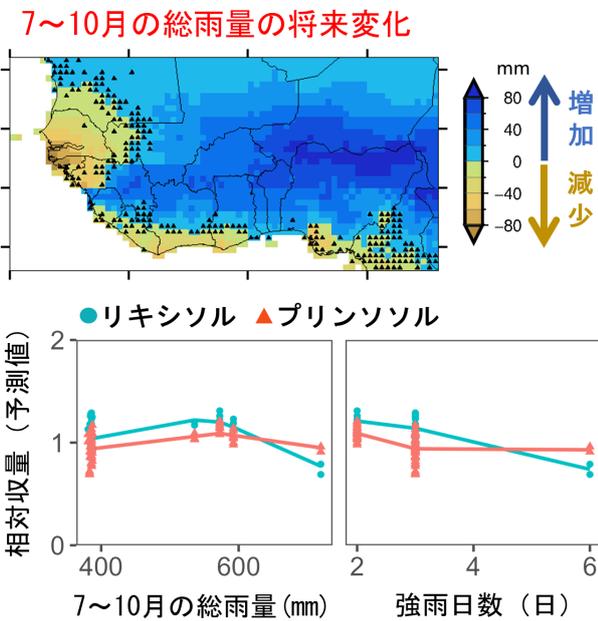


図2 西アフリカにおける降雨変化の将来予測と降雨変化に対するササゲの収量応答

（上）ササゲの生育期間（7～10月中旬）における総降雨量について、現在（1990～2019年）と比較した将来（2020～2049年）の変化予測。CMIP6シミュレーションの解析結果。図中の黒点は変化の有意差が5%水準以下の地点。（下）降雨量と強雨（日30mm以上）日数の増加に対するササゲ収量の予測値を平均収量に対する相対値で示した。直線は局所多項回帰。

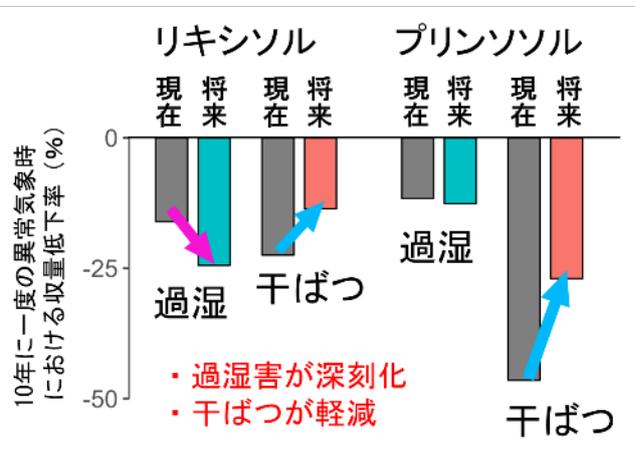


図3 異なる土壌型における極端気象発生時のササゲ収量の比較

極端な過湿および干ばつ発生時におけるリキシソルおよびプリンソソルでの収量低下率を、現在（1990～2019年）と将来（2020～2049年）で比較。

## ダイズさび病抵抗性品種 Kinoshita と Shiranui は 2 つ目の抵抗性遺伝子を有する

ダイズさび病抵抗性の提供親として広く利用されてきた品種 Kinoshita と Shiranui は、抵抗性遺伝子 *Rpp5* を有することで知られているが、*Rpp5* の他に *Rpp3* 遺伝子を保持する。*Rpp3* と *Rpp5* は様々なさび病菌に対する反応が異なるため、多くの地域のさび病菌に有効性が高い両品種の抵抗性を新品種に導入するには、2 つのさび病抵抗性遺伝子を両方導入することが有効である。

キーワード：ダイズ、ダイズさび病、抵抗性遺伝子、遺伝子集積、抵抗性育種

### 背景・ねらい

ダイズさび病は、ダイズの黄化・落葉を早め、減収を引き起こす主要なダイズ病害である。この病害は、世界中のダイズ生産地域、特に熱帯・亜熱帯地方で蔓延し、国際市場へのダイズの安定的供給上の重大な阻害要因となっている。また、近年さび病菌の殺菌剤感受性が低下したことにより、防除コストや環境負荷の増大が問題となっている。そこで、各地でダイズさび病に対する抵抗性遺伝子 (*Rpp*) を導入した品種開発が行われている（令和4年度国際農林水産業研究成果情報 C01「高いさび病抵抗性を有するダイズ新品種「Doncella INTA-JIRCAS」を開発」）。2008 年に *Rpp5* を保持する抵抗性品種であると同定された Kinoshita と Shiranui は各地で多くのダイズさび病菌に対して抵抗性を示すため、品種開発における抵抗性の提供親としてラテンアメリカやアジアで広く利用されている。しかし、広範なさび病菌への抵抗性を持つことから、両品種が *Rpp5* 以外の抵抗性も保有している可能性が示唆されている。よって、Kinoshita と Shiranui の持つ広範なさび病菌への抵抗性を品種開発において適切に活用するため、両品種の持つ抵抗性を明らかにする。

### 成果の内容・特徴

1. 抵抗性ダイズ品種 Kinoshita と Shiranui は、病原性が大きく異なり、多くの抵抗性遺伝子に非病原性となる日本産ダイズさび病菌株 E1-4-12 と殆どの抵抗性遺伝子に対し病原性を示す強病原性のブラジル産ダイズさび病菌株 BRP-2.5 の両方に抵抗性を示すが、両品種をそれぞれ感受性ダイズ品種 BRS 184 と交配し、それぞれ F<sub>1</sub> を自殖して得られた F<sub>2</sub> 集団においては、E1-4-12 と BRP-2.5 に対し、両菌株に抵抗性になる個体群、一方の菌株のみ抵抗性になる個体群、どちらの菌株に対しても感受性になる個体群が含まれる。
2. これら F<sub>2</sub> 集団において、E1-4-12 株と BRP-2.5 株に対する抵抗性についてそれぞれ QTL（量的形質遺伝子座）解析を行うと、BRP-2.5 株の感染では既報の様に *Rpp5* 遺伝子の染色体領域に抵抗性関連形質の QTL が検出されるが、E1-4-12 株の感染では *Rpp3* 遺

伝子の染色体領域に抵抗性関連形質の QTL が検出される（図 1）。

3. BRP-2.5 株に対する抵抗性の QTL 解析では *Rpp3* 領域には QTL が検出されず、E1-4-12 株に対する抵抗性の QTL 解析では *Rpp5* 領域には QTL が検出されないため（図 1）、ダイズ品種 Kinoshita と Shiranui はそれぞれ 2 菌株のうち BRP-2.5 株の病原性にのみ有効な *Rpp5* 遺伝子と、E1-4-12 株の病原性にのみ有効な *Rpp3* 遺伝子の両方の抵抗性遺伝子を持つ。
4. Kinoshita と Shiranui 両品種の *Rpp5* 遺伝子同士と *Rpp3* 遺伝子同士は遺伝子座の位置だけでなく、遺伝的効果が類似していることから 2 品種は *Rpp5* と *Rpp3* において、それぞれ同じか極めて類似した抵抗性型の対立遺伝子を有している可能性がある（表 1）。

### 成果の活用面・留意点

1. ダイズ圃場には E1-4-12 株と BRP-2.5 株それぞれの菌株と同種の病原性を持ったさび病菌が混在する可能性があるため、抵抗性品種 Kinoshita と Shiranui をさび病抵抗性の提供親として品種開発に利用する際は、*Rpp5* と *Rpp3* の両方を導入するべきである。
2. 両品種で新たに同定した *Rpp3* の 6 番染色体座乗位置を、Kinoshita については 1.6 cM のマーカー間に、Shiranui については 1.8 cM のマーカー間に同定したため（図 1）、隣接するマーカーを用いて効果的・効率的にこの遺伝子の導入を行うことが出来る。
3. Kinoshita や Shiranui が感受性となるさび病菌に対しては、*Rpp5* と *Rpp3* の両方を導入した系統も効果が無いため、他の *Rpp* 遺伝子を併せて導入する必要がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [理事長インセンティブ トップダウン経費（第 5 期）、B4 病虫害防除（第 4 期）]

研究実施期間：2017～2023 年度

研究担当者：山中直樹（生物資源・利用領域）、青柳ルシア  
—ノ暢宏（生物資源・利用領域、現農研機構）

発表論文等：Yamanaka et al. (2023) *Plants* 12(12): 2263.

<https://doi.org/10.3390/plants12122263>

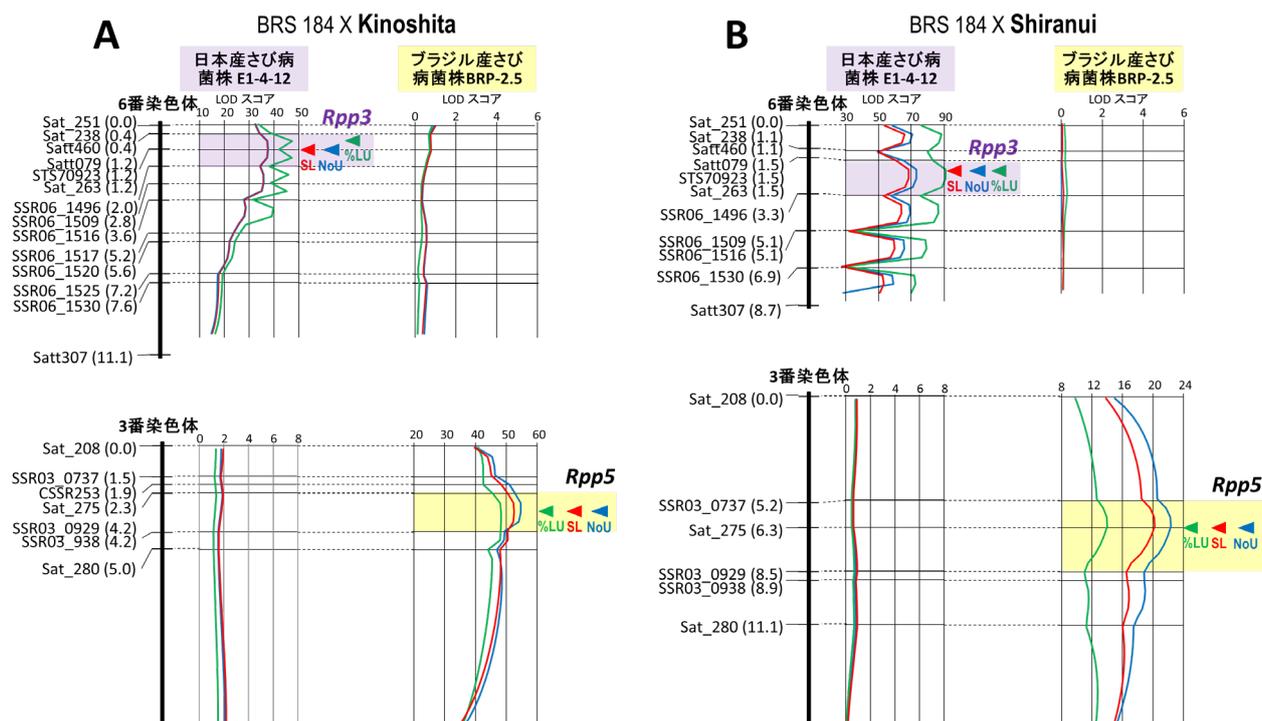


図1 感受性品種 BRS 184 と Kinoshita (A) と Shiranui (B) の交配集団によるダイズさび病抵抗性遺伝子 *Rpp3* と *Rpp5* 周辺の遺伝地図

各連鎖群の左に DNA マーカー名と上端のマーカーからの遺伝的距離を、各連鎖群の右に E1-4-12 菌株および BRP-2.5 菌株に対する抵抗性関連形質（病斑当たりの胞子堆数：NoU；胞子堆を形成した病斑の割合：%LU；病斑当たりの胞子生産量：SL）の QTL 解析における LOD 値と LOD 値のピークをそれぞれ示す。

表1 さび病斑当たりの胞子堆数(NoU)における抵抗性遺伝子 *Rpp3* および *Rpp5* の遺伝的効果と寄与率

集団の両親	抵抗性遺伝子	再近接マーカー	さび病菌株	相加効果 <sup>1)</sup>	優性効果 <sup>1)</sup>	寄与率 (%)
BRS 184 × Kinoshita	<i>Rpp5</i>	SSR03_0929	BRP-2.5	-1.15	-0.03	82.60%
	<i>Rpp3</i>	Sat_263	E1-4-12	-0.81	-0.74	51.50%
BRS 184 × Shiranui	<i>Rpp5</i>	Sat_275	BRP-2.5	-0.97	-0.09	52.29%
	<i>Rpp3</i>	Sat_263	E1-4-12	-0.82	-0.81	52.37%

<sup>1)</sup> 遺伝的効果（相加効果および優性効果）は感受性型（BRS 184）対立遺伝子に対する抵抗性型（Kinoshita または Shiranui）対立遺伝子の相対的効果をそれぞれ示す。Kinoshita と Shiranui の *Rpp5* はそれぞれ優性効果が小さいため共優性となり、両品種の *Rpp3* はそれぞれ完全優性となる。

## 統合環境制御と補光の併用は亜熱帯地域のイチゴ生産を増収させる

高温多湿な亜熱帯地域においても統合環境制御システムを用いることにより、イチゴの収穫量は国内平均と同程度に増加する。また日射量が少ない冬季や雨季においては、環境制御に加えて日中に LED 補光することで収穫量は増加し果実糖度も向上する。

キーワード：亜熱帯地域、イチゴ、LED、環境制御、植物工場

### 背景・ねらい

高品質なイチゴ(*Fragaria* × *ananassa* Duch.)は東南アジアをはじめとする熱帯・亜熱帯地域でも需要が高い。しかし、イチゴの商業的な栽培のほとんどは冬季の気温が $-20^{\circ}\text{C}$ から $15^{\circ}\text{C}$ といった冷涼な地域で行われており、高温多湿な環境でのイチゴ栽培技術は確立されていない。高温多湿な環境でイチゴ生産を行う方法の一つとして、ハウスなどの施設を用いて温度管理や補光などの環境制御を行う方法が考えられる。なかでも統合環境制御システムは、気温や湿度、日射量などをモニタリングしながらプログラムに基づいて複数の環境制御装置を動作させるシステムである。沖縄県石垣市の熱帯・島嶼研究拠点において熱帯・亜熱帯地域向けに統合環境制御システムを導入したアジアモンスーンモデル植物工場の開発を行っており、同システムを用いたイチゴ生産技術の開発を進めている。

近年、イチゴなどの生産向上のために LED 照明による補光技術を用いた研究が各地で行われている。熱帯・亜熱帯地域においても、雨季では高温でありながら日射量が低下する気象条件が続くことから補光技術は収量や品質向上に有効であると考えられるが、熱帯・亜熱帯地域での補光効果を検証した試みは少ない。

本研究では、熱帯・島嶼研究拠点内で環境制御を行わないハウス（対照区）と統合環境制御を行うハウス（環境制御区）、統合環境制御に加えて日の出から日没まで LED 補光を行うハウス（環境制御 + LED 区）の3棟を用いてイチゴ2品種（‘よつぼし’、‘紅ほっぺ’）を栽培し、生育、収穫量、果実重、糖度を調査し、亜熱帯地域における統合環境制御や LED 補光の効果を明らかにする。

### 成果の内容・特徴

1. 環境制御区と環境制御 + LED 区では夜間冷房や遮光、換気、細霧冷房を組み合わせる動作することにより日平均気温が対照区よりも低い（表 1）。また、培地温も培地冷却により環境制御区と環境制御 + LED 区では対照区よりも低く、亜熱帯地域においても統合環境制御を導入することでハウス内気温は低く制御できる。

2. 亜熱帯地域である石垣市においても冬季には天候に関係なく環境制御 + LED 区では光合成光量子束密度は増加するが（図 1a, b）、1 日の日射量が  $20\text{MJ m}^{-2}$  を超える 4 月以降は晴天時の光合成光量子束密度はハウス間で差がない（図 1c）。一方で 4 月以降であっても曇天時には LED 補光により光合成光量子束密度は増加する（図 1d）。
3. 環境制御区では統合環境制御により収穫量は日本の国内平均と同等の収穫量（およそ  $410\text{g/株}$  :  $3.3\text{ t/10a}$  で  $10\text{a}$  あたり  $8,000$  株とした場合）となる（図 2）。また、果実重  $6\text{g}$  以上の可販果率も統合環境制御により向上する。
4. 環境制御 + LED 区では収穫量は環境制御区よりも有意に増加する ( $P < 0.05$ ) が、可販果率は変わらない（図 2）。
5. 統合環境制御により収穫果実数、果実重、果実糖度は、対照区と比べて有意に増加し ( $P < 0.05$ )、LED 補光を併用することで果実数と果実糖度はさらに増加する ( $P < 0.05$ )（表 2）。

### 成果の活用面・留意点

1. 統合環境制御の導入により高温多湿な環境においても日本品種のイチゴの収穫量と品質は向上する。
2. 亜熱帯地域においても日中の補光は収穫量と果実品質を向上させる有効な技術である。一方で、日射量が 1 日あたり  $20\text{MJ m}^{-2}$  を超える環境では効果が限定的であることから、LED 照明の導入については地域の気象条件を考慮する必要がある。また、電力コストも考慮したより効率的な補光方法を検討していく必要がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [C2 実用化連携（第 5 期）]、外部資金 [シチズン電子 熱帯・亜熱帯地域のイチゴ栽培技術最適化とゾーニング]

研究実施期間：2021～2022 年度

研究担当者：中山正和（熱帯・島嶼研究拠点）、中澤義英（シチズン電子）

発表論文等：Nakayama and Nakazawa. (2023) *Sci. Hortic.* 321: 112349. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112349>

表1 栽培期間中の月ごとのハウス内の日平均気温と平均培地温(°C)

ハウス	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月
日平均気温							
対照区	23.1	21.5	20.0	19.3	23.1	25.5	25.3
環境制御区	19.9	18.4	17.7	17.8	21.2	23.2	22.6
環境+LED区	21.1	19.1	18.8	18.9	21.5	22.8	22.5
平均培地温							
対照区	23.2	21.8	21.2	19.9	23.9	26.8	26.5
環境制御区	17.2	16.7	16.3	16.6	17.8	18.9	18.7
環境+LED区	18.2	17.3	17.1	17.4	18.8	19.8	19.8

ハウス内気温はハウス中央の高さ1.5m、培地温は株間の深さ5cmの地点をそれぞれ測定した。

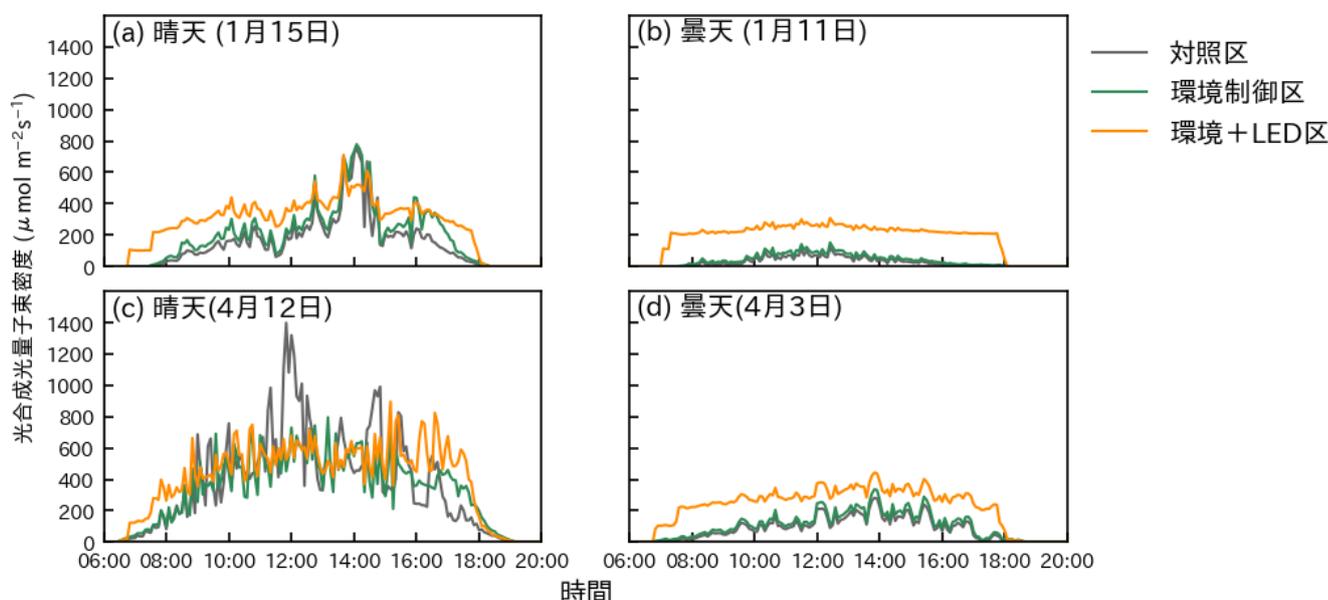


図1 対照区、環境制御区、LED区の1月（冬）と4月（春）のハウス内の光合成光量子束密度

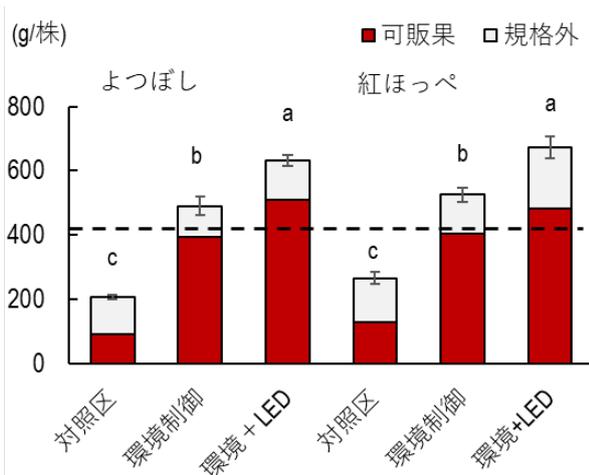


図2 総収穫量と可販果収量

可販果は6g以上の正常果とした。ハウスと品種の交互作用はなく、異なるアルファベットは Tukey HDS 法により 5%水準で有意差があることを示す。破線は国内平均（410g/株）を示す。

表2 収穫果実数、果実重および糖度

	果実数 (個/株)	果実重 (g)	糖度
ハウス間			
対照区	34.9 c	10.6 b	7.4 c
環境制御区	45.3 b	13.6 a	7.7 b
環境+LED区	56.2 a	14.1 a	8.0 a
品種間			
よつぼし	47.3 NS	12.5 NS	7.7 NS
紅ほっぺ	43.7	14.5	7.7

ハウスと品種の交互作用はなく、異なるアルファベットは Tukey HDS 法により 5%水準で有意差があることを、NSは有意差がないことを示す。

図表は Nakayama and Nakazawa (2023) © Elsevier B.V. より転載/改変して作成（転載/改変許諾済み）

## サトウキビとエリアンサスの属間交配によりサトウキビ根系特性の改良が可能である

エリアンサスは、乾燥ストレス耐性と関連する深根性やリグニンの根への沈着が多い特性を具えるサトウキビの近縁属遺伝資源である。サトウキビとエリアンサスの属間雑種 F<sub>1</sub> は、サトウキビより土壌深層の根長密度が大きく、根のリグニン含量が多いことから、エリアンサスをサトウキビの育種に利用することで、サトウキビの乾燥ストレス耐性に関連する根系特性の改良が可能である。

キーワード：遺伝資源、乾燥ストレス耐性、深根性、属間雑種、リグニン

### 背景・ねらい

気候変動下での作物の生産性向上や持続的生産に向けて、干ばつ等の乾燥ストレスに強い作物の開発が求められており、土中から養水分を吸収する根の改良は、そのための重要な課題である。世界の食料・エネルギー生産にとって重要な作物であるサトウキビ(*Saccharum spp hybrid*)においても、干ばつ被害等の増加が懸念されており、根系特性の改良による乾燥ストレス耐性の大幅な向上が求められている。しかし、サトウキビの根系改良に関する報告は少なく、既存の育種素材を利用した育種改良の限界も指摘されている。サトウキビの近縁属遺伝資源であるエリアンサス(*Erianthus arundinaceus*)は、根が大きく、深く発達するため、干ばつへの適応性に優れる。また、植物細胞壁を構成する主要成分の一つであり、乾燥ストレス耐性とも関連するリグニン（高分子のフェノール性化合物）の沈着が根で多いことから、サトウキビの根系改良のための新たな遺伝資源として期待できる。

国際農研では、エリアンサスの育種利用に向けて、サトウキビとエリアンサスの属間雑種 F<sub>1</sub> 集団を作出し、その農業特性や細胞遺伝学的特性を明らかにした（平成30年度国際農林水産業研究成果情報 B06「サトウキビの新しい育種素材となるサトウキビとエリアンサスの属間雑種の作出」）。一方、サトウキビの根系改良に向けたエリアンサス利用の可能性については明らかにできなかった。本研究では、属間雑種 F<sub>1</sub> 系統の根系特性を評価し、乾燥ストレス耐性の改良が期待できる深根性やリグニン含量等に関するエリアンサスの根系特性が、サトウキビに導入できるかについて明らかにする。

### 成果の内容・特徴

1. 本研究では、これまでに作出した属間雑種 F<sub>1</sub> 集団から、最もバイオマス生産性が高い系統「J08-12」を選定し、根系特性を評価した。本研究での試験においても「J08-12」は、母本としたサトウキビ「NiF8」より茎数が多く、同程度以上の地上部乾物重となる（表1）。
2. エリアンサスは「NiF8」より株あたり根乾物重が大きく、地上部重/根重比は小さい。「J08-12」は、エリアンサスと同様に、「NiF8」と比較して株あたり根乾物重は同程

- 度以上で、地上部重/根重比は小さいため、エリアンサスと同様に根に多くの乾物を分配する（表1、図1）。
3. 「J08-12」は、地表面から60cm以深の土壌深層の根長密度が「NiF8」より大きく、エリアンサスと同様に根が深く発達する（表2、図1）。
4. 根のリグニン含量は、「NiF8」で少なく、エリアンサスが多い。「J08-12」は、エリアンサスと同様に、根のリグニン含量が「NiF8」より多い（表1）。
5. 以上のことから、サトウキビとエリアンサスの属間交配により、エリアンサスの根系特性がサトウキビに導入可能であり、エリアンサスは、サトウキビの乾燥ストレス耐性の向上に向けた根系改良に有用な新たな遺伝資源となり得る。

### 成果の活用面・留意点

1. 本成果は、サトウキビとエリアンサスの属間交配により、サトウキビの乾燥ストレス耐性に関連する根系特性を改良できることを示す世界初の報告である。エリアンサスをサトウキビ改良へ利用する際の基礎情報として、また、他の作物における近縁属遺伝資源を利用した根系改良の可能性を示す基礎情報として利用できる。
2. 本研究で選定・評価した属間雑種「J08-12」は、サトウキビの乾燥ストレス耐性と関連する根系特性の改良に向けた新しい育種素材として活用できる。
3. 根系改良が乾燥ストレス耐性等へ与える具体的な影響については、今後の評価が必要である。

### その他

予算区分：交付金プロ [C4 熱帯作物資源（第5期）、B3 高バイオマス作物（第4期）、B4 熱帯作物開発（第3期）]、外部資金 [沖縄県 糖業の高度化事業、科研費 21K14836]  
 研究実施期間：2011～2023 年度  
 研究担当者：寺島義文、杉本明、高木洋子、安藤象太郎、山中慎介（熱帯・島嶼研究拠点）、Tippayawat, A.（コンケン畑作物研究センター）、伊禮信（沖縄県農業研究センター）、林久喜（筑波大学）  
 発表論文等：Terajima et al. (2023) *Field Crops Research* 297: 10892. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108920>

**表1 サトウキビとエリアンサスの属間雑種「J08-12」の地上部および地下部特性**

試験	品種・系統	地上部乾物重 (t ha <sup>-1</sup> )	茎数 (本 ha <sup>-1</sup> )	根乾物重 (g stool <sup>-1</sup> )	地上部重 /根重比	根のリグニン含量 (mg g <sup>-1</sup> -DW)
試験1	J08-12	31.9 ns <sup>1)</sup>	131,305 *	80 ns	18 *	163 ns
	NiF8	20.3	63,161	24	35	140
	IJ76-349	58.8 *	117,041 *	251 *	10 *	193 *
	JW630	46.1 *	552,315 *	170 *	12 *	228 *
試験2	J08-12	31.6 ns	145,688 ns	65 ns	26 ns	166 *
	NiF8	27.3	100,714	42	30	133
	JIRCAS1	51.7 *	588,810 *	214 *	16 *	199 *

1) Dunnet の検定により、「NiF8」と比べて、\*は 5%水準で有意差あり、ns は有意差なしを示す。試験1 は 2010 年に植え付け、2011 年 1 月、2012 年 1 月、2012 年 12 月に収穫した 3 年間のデータの平均値。試験2 は、2013 年に植え付け、2014 年 1 月、2015 年 2 月に収穫した 2 年間のデータの平均値。「NiF8」はサトウキビ品種。「IJ76-349」、「JW630」、「JIRCAS1」はエリアンサス系統。「J08-12」は「NiF8」と「JIRCAS1」を交配して作出した属間雑種 F<sub>1</sub> 系統。

**表2 サトウキビとエリアンサスの属間雑種「J08-12」の各土壌深度における根長密度 (cm cm<sup>-3</sup>)**

試験	品種・系統	土壌深度					
		0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm	100-120 cm
試験1	J08-12	1.07 ns <sup>1)</sup>	0.49 ns	0.41 *	0.30 ns	0.23 ns	0.24 *
	NiF8	0.85	0.61	0.20	0.11	0.08	0.04
	IJ76-349	3.18 *	1.20 *	0.66 *	0.30 ns	0.34 *	0.37 *
	JW630	3.03 *	1.31 *	0.62 *	0.33 ns	0.31 *	0.26 *
試験2	J08-12	1.55 ns	0.61 ns	0.53 ns	0.45 *	0.29 *	0.21 *
	NiF8	1.28	0.55	0.36	0.18	0.09	0.04
	JIRCAS1	2.53 ns	1.09 ns	0.65 ns	0.56 *	0.32 *	0.32 *

1) Dunnet の検定により、「NiF8」と比べて、\*は 5%水準で有意差あり、ns は有意差なしを示す。試験1 は 2010 年に植え付け、2011 年 1 月、2012 年 1 月、2012 年 12 月に収穫した株出し 2 回目の根系を調査した。試験2 は、2013 年に植え付け、2014 年 1 月、2015 年 2 月に収穫した株出し 1 回目の根系を調査した。



**図1 サトウキビとエリアンサスの属間雑種「J08-12」の根の量（上）と分布（下）**

試験1 での根系調査時の写真。属間雑種「J08-12」は根の量が「NiF8」より多く、深く分布している。

図は Terajima et al. (2023) © The Author(s) 2023 より転載/改変して作成

## パッションフルーツの高温域での光合成能は非ストレス条件下の蒸散能で決まる

パッションフルーツにおいて、非ストレス条件（葉温が 30°C）下で蒸散速度が高い品種・系統は、葉温が 40°C 以上になる極めて高温の条件下でも高い純光合成速度を維持する。また、気孔のサイズが大きい品種・系統ほど高い蒸散速度と大きな気孔コンダクタンスを示す。非ストレス条件下での蒸散能や気孔のサイズを選抜指標として利用することで、高温でも高い光合成能を示す系統を効率良く選抜できることが期待される。

キーワード：気孔、光合成、蒸散、高温耐性、パッションフルーツ

### 背景・ねらい

近年の気候変動による温暖化の影響で、温帯および亜熱帯地域の作物生産が高温害によって脅かされているが、熱帯原産の作物においても高温害は例外でない。パッションフルーツ（*Passiflora* spp.、クダモノケイソウ）は熱帯高地原産であり、一部の種は熱帯低地でも栽培が可能であるものの、概して高温環境下で生育や生産性が劣る。ムラサキクダモノケイソウ（*P. edulis*）は果汁の酸度が低く生食での食味が優れる一方で高温での生育や生産性が著しく劣る。キイロトケイソウ（*P. edulis* f. *flavicarpa*）は高温に強く一部の熱帯低地でも栽培されるものの、果汁の酸度が高く生食に向かず加工用である。生食用の高品質果実を安定生産するため世界の様々な地域でこれらの交雑品種が作出されているが、高温に強く食味も優れる品種は未だなく、夏季の生産はやはり安定しない。温暖化に対するパッションフルーツの適応性を高めるためには、既存の遺伝資源やそれらの交雑後代の中から高温に適した形質を持つ優れた品種・系統を効率的に選抜する技術開発が急務であるが、夏季の高温多湿な圃場環境下における光合成能を正確に実測し評価することは技術的に非常に困難である。

本研究では、温暖化に適応するための基礎的な評価指標として、30°C を超える高温条件下での個葉光合成速度の減少に着目し、携帯型光合成・蒸散測定装置を用いて、交雑品種および近縁種を含む様々なパッションフルーツ 13 品種・系統について葉温 30–45°C における個葉の光合成を人工気象室内の精緻な環境下で測定する（図 1）。光合成速度と蒸散速度および気孔コンダクタンス（数値が高いほど気孔が開いていて、二酸化炭素が葉内に取り込まれやすいことを示す気孔開度の指標）、気孔形態との関係を分析して、高温域での光合成能と強く関連する形質を明らかにする。

### 成果の内容・特徴

1. 葉温 40°C まではおもに気孔の閉鎖で総光合成速度および純光合成速度が低下する一方、葉温 40°C 以上では呼吸量の増加もあり純光合成速度のみ低下する（図 2）。

2. 葉温が 35°C 以上の高温条件下での光合成低下程度は、非ストレス条件（葉温 30°C）下での蒸散速度および気孔コンダクタンスと強く相関し（ $p < 0.01$ ）、気孔がよく開き蒸散速度が高い品種・系統ほど高温条件下で純光合成速度が低下しにくい（図 3）。
3. 高温条件下での純光合成速度の低下程度、非ストレス条件（葉温が 30°C）下での蒸散速度および気孔コンダクタンスは、気孔のサイズと強く相関し（ $p < 0.01$ ）、気孔サイズが大きい品種・系統ほど葉温が 40°C 以上の極めて高温の条件下で純光合成速度を高く維持し、且つ非ストレス条件下での蒸散速度が高く、気孔コンダクタンスが大きい（表 1）。

### 成果の活用面・留意点

1. パッションフルーツにおいて、非ストレス条件下での蒸散能が、温暖化適応への基礎的な指標として評価や選抜に利用できるという本知見は、交配育種による高品質で高温に耐性を持つ系統の作出に役立つ。
2. 比較的高温耐性がある熱帯作物においても、施設栽培が中心の我が国では高温の悪影響が懸念されている。本知見は、「みどりの食料システム戦略」で農業生産全般の技術開発目標に挙げられる「耐暑性を向上させた高機能な品種開発」に貢献する情報となる。
3. 気孔のサイズと密度は一般的にトレードオフの関係にあるが、パッションフルーツでは気孔のサイズが蒸散能と強く関係し、温暖化適応への基礎的な評価指標としての利用可能性が示唆される。ただし、熱帯低地の近縁種（*P. alata* と *P. laurifolia*）を含む交雑育種への本成果の適用については別途検討していく必要がある。
4. 蒸散能の形質を効率的に取得するために、蒸散のみを測定するポロメーター法などを用いた簡便な評価手法を今後検討していく必要がある。

### その他

予算区分：交付金プロ [C4 熱帯作物資源（第 5 期）]  
研究実施期間：2020～2021 年度  
研究担当者：松田大志、寶川拓生（熱帯・島嶼研究拠点）  
発表論文等：Matsuda and Takaragawa (2023) *Horticult. J.* 92: 412–423. <https://doi.org/10.2503/hortj.QH-060>



図1 人工気象室内での光合成測定

温室内で栽培したパッションフルーツ13品種・系統を2021年6月から7月および12月に人工気象室内で葉温を6段階に制御して光合成を測定した。

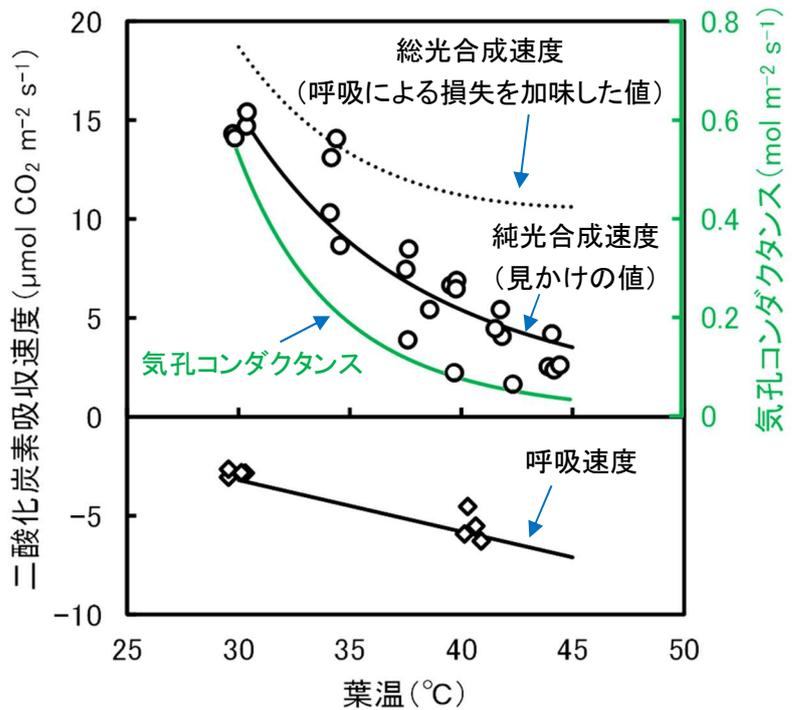


図2 葉温と光合成速度・呼吸速度・気孔コンダクタンスの関係

室温を28°C~40°Cに変化させながら、30°C~45°Cの範囲で様々な葉温で測定し得られた純光合成および呼吸速度のデータをそれぞれシグモイド曲線帰帰、線形帰帰分析をおこない、総光合成速度を推定した。品種ルビースターのデータを示す。

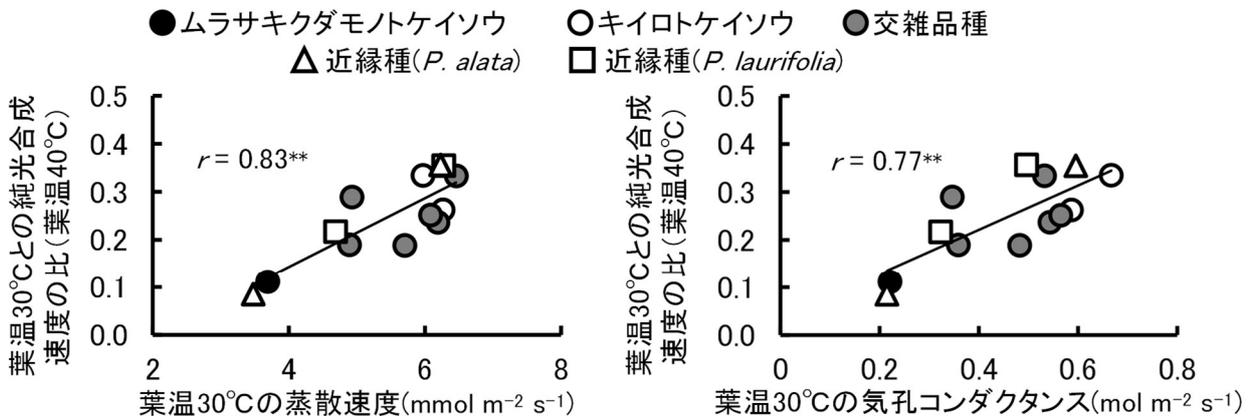


図3 パッションフルーツ13品種・系統における高温での光合成の低下程度と非ストレス条件（葉温30°C）での蒸散能（蒸散速度・気孔コンダクタンス）との関係

\*\*は1%水準で有意な相関があることを示す。蒸散能それぞれについて、葉温40°Cにおける光合成の低下程度とのデータを示す。

表1 熱帯低地の近縁種を除く9品種・系統における高温での光合成の低下程度および非ストレス条件（葉温30°C）での蒸散能と気孔形質との間の相関

	気孔密度	気孔サイズ
葉温30°Cとの純光合成速度の比（葉温35°C）	- 0.76 **	0.43 NS
葉温30°Cとの純光合成速度の比（葉温40°C）	- 0.55 NS	0.90 **
葉温30°Cとの純光合成速度の比（葉温45°C）	- 0.60 NS	0.82 **
葉温30°Cの蒸散速度	- 0.67 *	0.79 **
葉温30°Cの気孔コンダクタンス	- 0.59 NS	0.88 **

\*、\*\*はそれぞれ5%水準、1%水準で有意な相関があることを示す。NSは有意でないことを示す。

国立研究開発法人

## 国際農林水産業研究センター

---

〒305-8686

茨城県つくば市大わし 1-1

TEL : 029-838-6313

FAX : 029-838-6316

---

### 熱帯・島嶼研究拠点

〒907-0002

沖縄県石垣市字真栄里川良原 1091-1

TEL : 0980-82-2306

FAX : 0980-82-0614

---

公式 Web ページ

<https://www.jircas.go.jp/>

