

Press Release

【2023 年 9 月 26 日】
送付枚数 本票含め 9 枚



報道機関 各位

国立大学法人 山口大学
国立研究開発法人 理化学研究所
国立大学法人 鳥取大学
国立大学法人 宇都宮大学

干ばつがパンコムギ種子に及ぼす分子的影響の解明 -乾燥被害による減収、小麦粉品質の低下を食い止める-

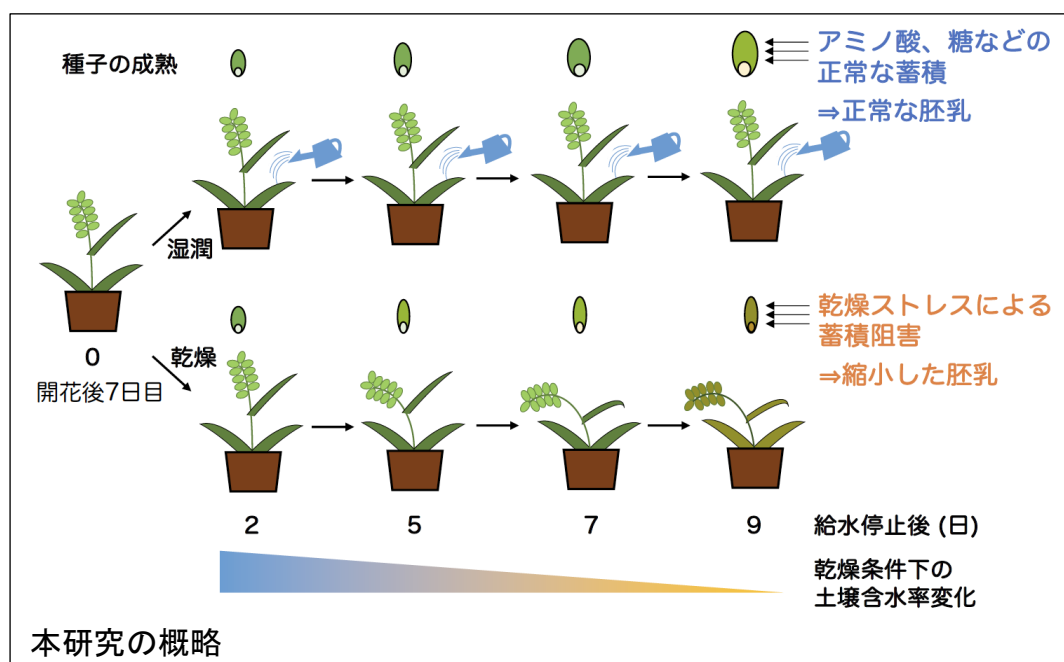
【発表のポイント】

- パンコムギ種子の成熟過程で起こる遺伝子発現および代謝物変動に特徴があることが判明
- 種子貯蔵タンパク質を構成するアミノ酸が乾燥ストレス下での正常な種子成熟に寄与することが判明
- 乾燥地栽培に適した系統開発において新規育種目標となることを期待

【概要】

近年の気候変動によるパンコムギ生産地を直撃する干ばつの影響は、農作物減収の主な要因となっており、世界で増え続ける人口を養うため食糧の生産と確保が懸念されています。また、パンコムギは種子成熟期にストレスがかかると、結実する種子の品質が損なわれ、商品価値が下がってしまうことが懸念されています。そこで、山口大学の妻鹿良亮准教授らの研究チーム^{注1)}は、耐乾性に関与するアブシシン酸(ABA)受容体をパンコムギの植物体内で多く作らせた、遺伝子組換え体の耐乾性系統(TaPYLx)とそうでない系統(コントロール)に開花 1 週間後の種子成熟過程の植物に乾燥ストレスを意図的に与えることで、成熟途上種子が受ける影響をトランスクリプトーム^{注2)}解析、およびメタボローム^{注3)}解析により調べました。その結果、小麦粉の品質を左右する種子貯蔵タンパク質^{注4)}の主要構成アミノ酸であるプロリンが乾燥ストレス下でも TaPYLx は種子に多く存在することが判明しました。一方で、コントロール系統は TaPYLx ほどプロリンの存在量が増加せず、結実する種子も TaPYLx と比較すると小さく、種子貯蔵タンパク質およびデンプンの存在量も乾燥ストレス環境下でも TaPYLx の方が多く、種子の形成に必要な成分の蓄積が、非ストレス下と変わらないことが重要であることが示唆されました。本研究結果は、干ばつ下においても品質を維持できるパンコムギ系統開発の際の育種目標となる形質について明らかにし、極端化する気候変動に対応できる系統開発に一石を投じると期待されます。

本研究は、山口大学大学院創成科学研究科の妻鹿良亮准教授、理化学研究所環境資源科学研究センター(CSRs)の金俊植研究員、鳥取大学農学部の中裕之准教授、同大乾燥地研究センターの石井孝佳准教授、農業・食品産業技術総合研究機構作物研究部門の安倍史高上級研究員、宇都宮大学バイオサイエンス教育研究センターの岡本昌憲准教授（兼、理化学研究所 CSRs チームリーダー）らを中心とする研究チームによる研究成果として、2023 年 9 月 11 日（英国時間）に国際学術雑誌「Scientific Reports」のオンライン版で公開されました。



【研究の背景と経緯】

近年、地球規模で起こる気候変動は、大規模な干ばつの発生、および砂漠などの乾燥地の拡大といった影響をもたらし、パンコムギ生産の主な減収要因となっています。パンコムギは先進国だけでなく、経済発展に伴ってアフリカなどの発展途上国でも特に需要が高く、将来にわたって世界的な食糧の安定供給を実現するには、干ばつ下あるいは乾燥地でも減収を抑えることが可能な耐乾性パンコムギを開発することが急務となっています。また、パンコムギは種子を粉砕し、小麦粉という形で製品化されることから、種子の品質は産業的観点から重要視されています。

これまで、様々な作物やモデル植物の植物体の耐乾性研究は盛んに行われてきており、十分な情報が得られているものの、乾燥ストレス環境下で、パンコムギの種子が縮小し、種子の品質を左右するデンプンやタンパク質含量が低下する分子生理学的な原因について言及した研究例は少ないのが実情でした。そこで、本研究チームは乾燥した環境で栽培したパンコムギ種子が縮小し、収量が低下することに注目し、種子成熟過程でパンコムギの種子が受ける乾燥スト

レスの影響について、成熟途上種子のトランスクリプトームとメタボロームの変化を調べることで解明を試みました。

【研究の内容】

本研究チームは、植物ホルモンの一つであるアブシシン酸 (ABA) 受容体タンパク質を細胞内に多く蓄積（過剰発現）することができるパンコムギ（以下、TaPYLx）が水を制限した環境で栽培しても、種子の縮小が起こらないことを先行研究で見出しました（図 1）。本研究では、その形質に注目し、受粉後の種子が成熟過程において乾燥ストレスを与えると、耐乾性の TaPYLx とそのコントロール系統で種子の遺伝子発現あるいは代謝物蓄積が乾燥ストレスの進行とともにどのように変化するかを調べました。

その結果、乾燥感受性のコントロール株では、タンパク質合成、デンプン合成に関わる遺伝子群に加え、タンパク質の材料であるプロリンやアルギニンといった特定のアミノ酸合成に関わる遺伝子群の発現量が乾燥ストレスによって低下することを見出しました（図 2、3）。逆に TaPYLx ではこれらの遺伝子群の低下は確認されませんでした。また、これらの遺伝子群に連動した単糖およびアミノ酸といった代謝物の変動も見られ、耐性系統では種子が成熟する過程でタンパク質合成、デンプン合成が乾燥ストレス下でも滞ることなく行われ、なおかつ、材料となるアミノ酸が種子へと輸送されることが示唆されました。特にプロリンはパンコムギの種子貯蔵タンパク質として代表的なグルテニンとグリアジンの主要成分の一つです（図 4）。ゆえに、プロリンやデンプンの材料となる糖類の正常な合成あるいは輸送によって、胚乳が正常に成長することで種子の正常な成熟に寄与すると考えられました。

これらの結果から、干ばつに負けない高品質の小麦粉生産を可能にするメカニズムが明らかになったことで、今後、小麦粉の品質に着目した育種目標の標的遺伝子として、種子への糖、アミノ酸、タンパク質合成に関わる遺伝子が選ばれることが期待されます。

【今後の展開】

パンコムギは比較的乾燥した土地で栽培されており、乾燥に対する適応力が高い作物ですが、地球温暖化に伴う干ばつの甚大化によるパンコムギの減収は、今後も大きな課題となっていくことが予想されます。パンコムギは食料としての需要だけでなく、小麦粉として麺や生地などにも加工されます。それゆえ、高い加工適性を持った小麦粉が求められます。乾燥や高温などの環境ストレスはこの加工適性に影響を与え、品質の低下した小麦粉は商品価値が失われるため、生産者の収入減につながることで危惧されます。今回の研究結果は、干ばつ災害によるコムギへのダメージを抑え、環境変動に左右されない良質の小麦粉の原料となるコムギ栽培を行うための育種へと発展することが期待されます。

【参考図】

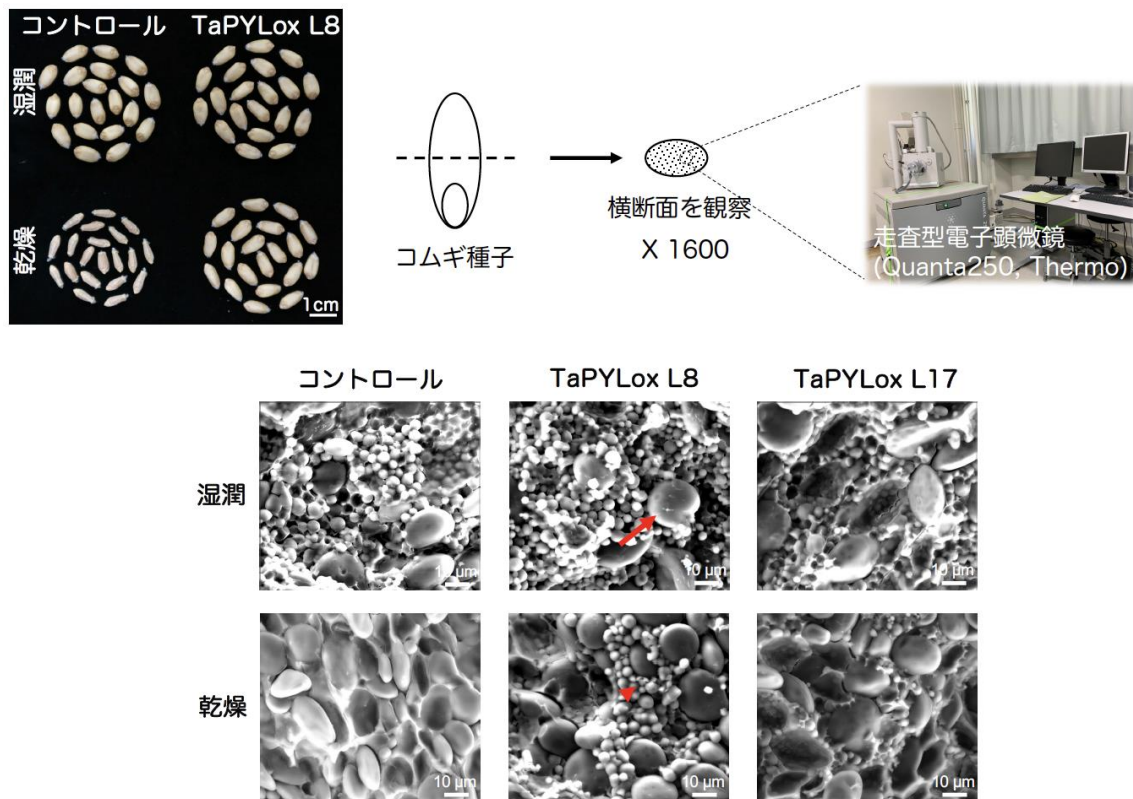


図 1. 乾燥ストレスによるデンプン粒へのダメージ

(左上写真) 栽培条件ごとのコントロール株と TaPYLox 種子。

(下写真) コントロール株と TaPYLox 種子の横断面の走査型電子顕微鏡写真。

湿潤区栽培の種子ではどの株でも大粒（赤矢印）と多くの小粒（赤三角）が存在しているが、乾燥に弱いコントロール株では乾燥区栽培によって小粒の形成が阻害されている。

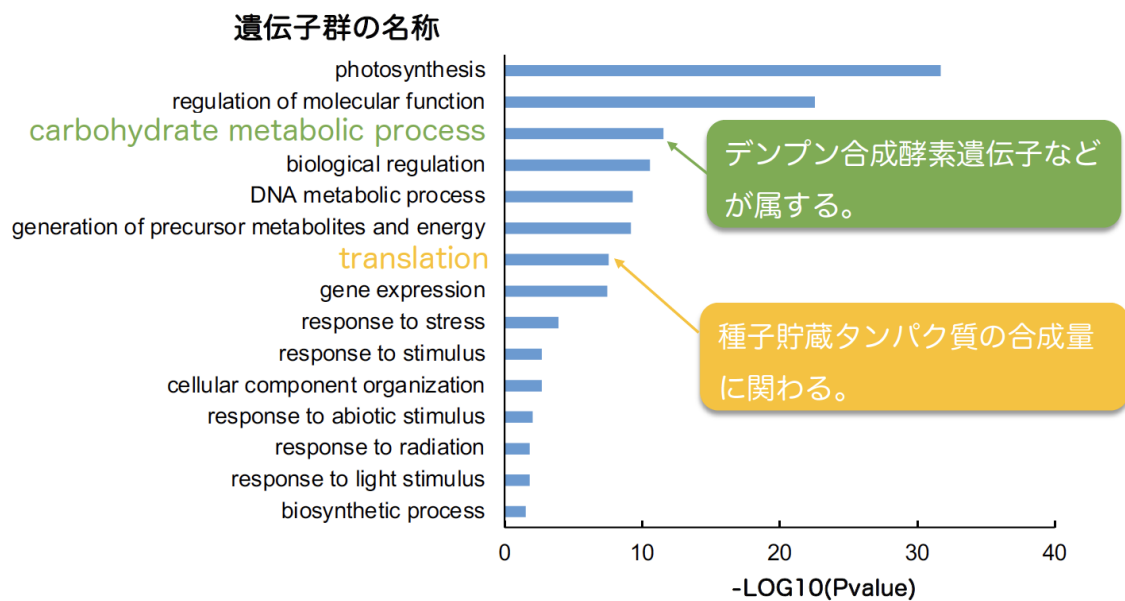


図2. トランスクリプトームデータを用いた遺伝オントロジー^{注5)}解析
乾燥条件で採取したサンプルで解析したトランスクリプトームの中からTaPYLx 株の方で発現量が多い遺伝子群を順番に並べた。横軸の p 値は検出された遺伝子群の信頼度を示す。

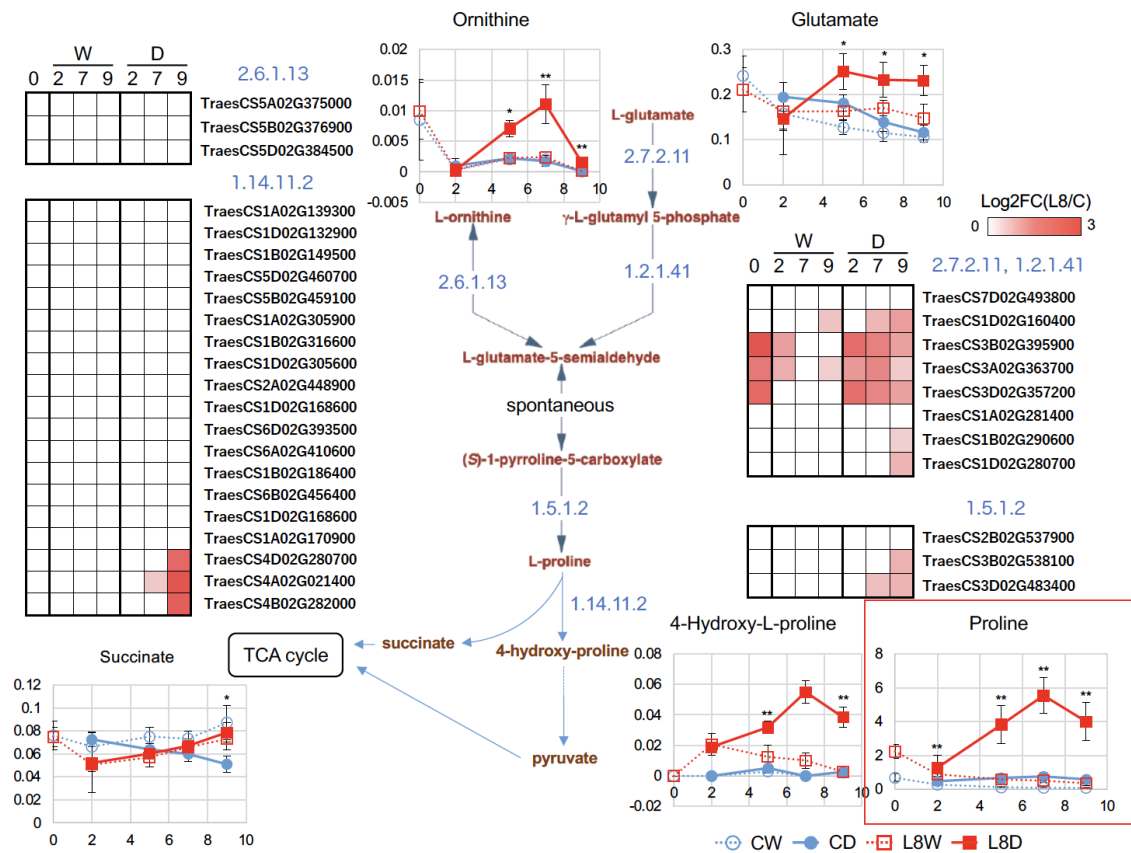


図3. プロリン合成経路の遺伝子発現および代謝物蓄積

カラーパネルはL8/Cの発現量比の対数値を示す。赤が濃いほどTaPYLox株における遺伝子発現量が高いことを示す。折れ線グラフは代謝物の蓄積量の変化を示す。CW: コントロール株の湿潤栽培、CD: コントロール株の乾燥処理、L8W: TaPYLox株の湿潤栽培、L8D: TaPYLox株の乾燥処理を示す。

遺伝子ID	遺伝子名	アミノ酸組成 (%)					
		1st	2nd	3rd	4th		
TraesCS1B02G329711.1	HMW-glutenin	Q	25.9	G	14.4	P	10.3
TraesCS1B02G011700.1	LMW-glutenin	Q	36.9	P	12.8	S	8.1
TraesCS1B02G013500.1	LMW-glutenin	Q	32.6	P	14.6	L	8.6
TraesCS1D02G000200.1	LMW-glutenin	Q	31.6	P	12.7	L	8.8
TraesCS1D02G000300.1	LMW-glutenin	Q	33.3	P	13.8	S	8.8
TraesCS1D02G007400.1	LMW-glutenin	Q	29.2	P	11.1	L	8.4
TraesCS1D02G009400.1	LMW-glutenin	Q	34.3	P	13.4	S	8.6
TraesCS1D02G009900.1	LMW-glutenin	Q	31.7	P	10.9	S	9.6
TraesCS1D02G015100.1	LMW-glutenin	Q	32.1	P	15.1	L	8.5
TraesCSU02G149946.1	Gliadin	Q	35.5	P	14.1	L	7.9
TraesCSU02G149951.1	Gliadin	Q	36.5	P	13.9	L	7.8
TraesCSU02G153800.1	Gliadin	Q	31.6	P	15.3	L	7.8
TraesCS6A02G048900.1	Gliadin	Q	34.9	P	14.5	L	8.5
TraesCS6A02G049100.1	Gliadin	Q	31.1	P	14.1	L	8.8
TraesCS6A02G049200.1	Gliadin	Q	36.6	P	13.1	L	8.5
TraesCS6A02G049400.1	Gliadin	Q	31	P	14.8	L	9.2
TraesCS6A02G049600.1	Gliadin	Q	32.4	P	14.6	L	8.7
TraesCS6A02G049700.1	Gliadin	Q	35.4	P	14.1	L	8.1
TraesCS6A02G049800.1	Gliadin	Q	30.5	P	14.7	L	9.3
TraesCSU02G188800.1	Gliadin	Q	34.2	P	15.6	L	8.1
TraesCSU02G220200.1	Gliadin	Q	34	P	14.5	L	7.7
TraesCSU02G220600.1	Gliadin	Q	32.4	P	14.8	L	8.3
TraesCSU02G239000.1	Gliadin	Q	34.1	P	15.6	L	8.1
TraesCS6B02G065800.1	Gliadin	Q	37	P	13.6	L	8.5
TraesCS6B02G065856.1	Gliadin	Q	35.8	P	14.1	L	8.6
TraesCS6B02G066000.1	Gliadin	Q	34.3	P	13.9	L	8.6
TraesCS6B02G066100.1	Gliadin	Q	35.1	P	14.1	L	7.6
TraesCS6B02G086500.1	Gliadin	Q	37.4	P	13.9	L	7.4
TraesCSU02G108100.1	Gliadin	Q	32.6	P	14.4	L	8.2
TraesCSU02G108300.1	Gliadin	Q	34.7	P	14.3	L	8
TraesCSU02G108400.1	Gliadin	Q	32.8	P	15.7	L	8.2
TraesCSU02G108500.1	Gliadin	Q	31.1	P	15.7	L	8.4
TraesCSU02G108700.1	Gliadin	Q	31.2	P	15.2	L	7.1
TraesCS1D02G000700.1	Gliadin	Q	18.9	P	9	V	8
TraesCS1D02G001000.1	Gliadin	Q	31.2	P	14.8	L	6.7
TraesCS1D02G001200.1	Gliadin	Q	33.9	P	16.2	L	8
TraesCS1A02G007400.1	Gliadin	Q	30.2	P	16.1	L	6.7
TraesCS1A02G007405.1	Gliadin	Q	30.2	P	16.1	L	6.7
TraesCS1A02G007700.1	Gliadin	Q	19.5	P	9	V	8.5
TraesCS1B02G010400.1	Gliadin	Q	29.8	P	16.2	L	7
TraesCS1B02G010500.1	Gliadin	Q	29	P	16.5	L	7.4
TraesCS1B02G010600.1	Gliadin	Q	26.8	P	14.5	L	11.7
TraesCS1B02G010800.1	Gliadin	Q	33.9	P	16.7	L	7.6
TraesCS1B02G011000.1	Gliadin	Q	30.2	P	15.1	L	8.2
TraesCS1B02G011300.1	Gliadin	Q	18.7	P	7.9	S	7.9
TraesCSU02G272393.1	Gliadin	Q	34.2	P	25.9	F	9.5

・コントロールで減少した代謝物

2-Aminobutyric acid
 2-Aminoethanol
 3-Methylglutarate
 4-Aminobutyric acid
 Alanine
 Asparagine
 Aspartic acid
 b-Alanine
 Citric acid + Isocitric acid
 Galactose
 Glucose
 Glycyl-Glycine
 homoserine
 Homoserine lactone
 Lysine
 Melibiose
 Methionine
 Ornithine
Proline (P)
 Putrescine
Serine (S)
 Threonine
 trans-4-Hydroxy-L-proline
 Unknown_367
Valine (V)

・コントロールで増加した代謝物

Kynurenine
 Maleic acid

図 4. コムギでコードされる種子貯蔵タンパク質のアミノ酸組成

左表はコムギでコードされる種子貯蔵タンパク質のアミノ酸組成を示す。赤枠は P（プロリン）の含有率を示しており、Q（グルタミン）に次いで全ての種子貯蔵タンパク質で 2 番目に多い。3、4 番目は S（セリン）、L（ロイシン）、V（バリン）、I（イソロイシン）などが多くなっている。

【謝辞】

本研究は以下の研究助成の支援を受けて実施されました。

妻鹿良亮

日本学術振興会 基盤研究(C) 20K06759

鳥取大学乾燥地研究センター共同研究 若手奨励研究 03D2003

山口大学拠点群形成プロジェクト 2021～2023

【用語解説】

注1) 共同研究チーム

山口大学:妻鹿 良亮

理化学研究所:金 俊植、岡本 昌憲

鳥取大学:田中 裕之、石井 孝佳

農研機構:安倍 史高

宇都宮大学:岡本 昌憲

注2) トランスクリプトーム

細胞内の全転写産物。転写産物（トランスクリプト）を包括的に解析すること（トランスクリプトーム解析）で実験条件によってどの機能を持った遺伝子が発現しているのかを群で捉え、その条件で活性化する生理的応答あるいは分子機能に関わる遺伝子を理解することが可能になる。

注3) メタボローム

生物が生産する代謝物（メタボライト）の総体。メタボライトを包括的に解析すること（メタボローム解析）で実験条件によってある代謝物の蓄積が前駆体代謝物の蓄積によるものか、あるいは分解産物が蓄積しないことによるものか、など代謝経路全体の変化で捉えることが可能になる。

注4) 種子貯蔵タンパク質

登熟期のコムギの種子に含まれるタンパク質。発芽の際に必要な栄養素を貯蔵するタンパク質である。コムギでは主としてグルテニン、グリアジンと呼ばれるグルテンの原材料となるタンパク質から構成される。グルテンは小麦粉に水を加えて生地にした際の粘りと弾力性といった品質を決定するタンパク質でグルテンの量および質に応じて強力粉、中力粉、薄力粉に区分される。

注5) ジーンオントロジー

遺伝子の属性を記述する語彙を統一化し、種を越えた遺伝子関連情報を記述したもの。すべての語彙は、biological process（生物学的プロセス）、cellular component（細胞の構成要素）、molecular function（分子機能）の3 カテゴリーのいずれかに属し、語彙と語彙の上下関係が一義に決まっている。

【論文情報】

- ・ 雑誌名: *Scientific Reports*
- ・ 論文タイトル: Metabolomic and transcriptomic profiling during wheat seed development under progressive drought conditions
- ・ 著者: 妻鹿良亮^{1,*}, 金俊植², 田中裕之³, 石井孝佳⁴, 安倍史高⁵, 岡本昌憲^{2,6}
(*責任著者,¹ 山口大学, ² 理研 CSRS, ³ 鳥取大学, ⁴ 鳥取大学乾燥地研究センター, ⁵ 農研機構, ⁶ 宇都宮大学)
- ・ 公表日: 2023 年 9 月 11 日 (オンライン公開)
- ・ DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42093-2>
- ・ URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-42093-2.pdf>

【問い合わせ先】

＜研究に関すること＞

山口大学大学院創成科学研究科農学系学域
准教授 妻鹿 良亮(めが りょうすけ)
E-mail: mega@yamaguchi-u.ac.jp

＜報道に関すること＞

山口大学総務企画部総務課広報室
TEL: 083-933-5007
FAX: 083-933-5013
E-mail: sh011@yamaguchi-u.ac.jp

理化学研究所 広報室 報道担当
TEL: 050-3495-0247
E-mail: [ex-press \[at\] ml.riken.jp](mailto:ex-press[at]ml.riken.jp)

宇都宮大学広報室
TEL: 028-649-5201
FAX: 028-649-5026
E-mail: kkouhou@miya.jm.utsunomiya-u.ac.jp

鳥取大学総務企画部総務企画課広報企画室
TEL: 0857-31-5006
FAX: 0857-31-5018
E-mail: toridai-kouhou@ml.adm.tottori-u.ac.jp