

PRESS RELEASE

令和 7 年 4 月 21 日
愛媛大学
ブエノスアイレス大学イネの受粉に関する新発見：
花粉粒の「起き上がりこぼし」運動とそのメカニズム

| 概要

愛媛大学大学院農学研究科 和田博史教授、荒木卓哉教授、畠山友翔助教、野並浩名誉教授、ブエノスアイレス大学有機化学科・国家科学技術研究会議（CONICET）ロザ エラ-バルセルス教授らの研究グループは、イネの受粉時に雌しべ上の花粉粒が、おもちゃの『起き上がりこぼし』の様に振り子状に運動することを世界で初めて見出しました。イネ開花に伴う約の開裂により飛散した花粉粒は、雌しべ付着後ほどなくして起こる花粉粒表面からの溢液の浸出に続いて、前後・左右に振り子運動した後、雌しべに接着、花粉水和を経て、発芽・花粉管を伸長させることが明らかとなりました。本研究では、長年注目されてこなかったイネ科植物に共通する花粉粒の溢液（汗かき）現象を再検討するため、細胞レベルの動態解析と愛媛大学のもつ 1 兆分の 1 リットルスケールの超微量試料の成分分析法とを組み合わせ、イネ花粉粒の物理的、かつ不可思議な挙動を発見するに至りました。本論文では、振り子運動の起こるメカニズム「オルガネラ再配置による花粉粒の重心移動説」についての新説も提唱しています。本知見は、開花期の高温でお米が稔らなくなる現象（高温不稔）の要因として、水稻の安定生産につながる重要な知見です。本成果は、2025 年 4 月 18 日（金）に英国 Springer Nature Group が刊行する国際学術誌、*Communications Biology* の電子版で公表されました。なお、本研究は、JSPS 科研費（22H00369）及び住友財団基礎科学研究助成（210315）の支援を受けて行われました。

| 発表雑誌

掲載誌：*Communications Biology*

DOI 番号：10.1038/s42003-025-08018-7

題名：‘Roly-poly toy’ motion during pollen exudation promotes rapid pollen adhesion in rice

著者：和田博史^{1, 2, *}、畠山友翔^{1, 2}、ロザ エラ-バルセルス³、棟田拓己²、野並浩²、上田光^{1, 4}、畠山（山賀）陽子²、宮下直也²、荒木卓哉^{1, 2}¹ 愛媛大学大学院連合農学研究科² 愛媛大学大学院農学研究科³ ブエノスアイレス大学有機化学科・国家科学技術研究会議（CONICET）⁴ 住化農業資材株式会社

*責任著者

論文 URL：<https://www.nature.com/articles/s42003-025-08018-7>

| 問い合わせ先

国立大学法人 愛媛大学大学院農学研究科 食料生産学専攻 植物工場システム学コース
植物細胞システム計測学 教授 和田 博史（わだ ひろし）

Tel: 089-946-9824

Fax: 089-946-9867

Email: hwada@agr.ehime-u.ac.jp

令和7年 4月 21 日
愛 媛 大 学
ブエノスアイレス大学

イネの受粉に関する新発見： 花粉粒の「起き上がりこぼし」運動とそのメカニズム

ポイント

- ・花粉水和を介する一般的な被子植物の受粉様式（図 1 A）とは対照的に、イネでは花粉粒が雌しべに達してほどなく起こる花粉粒の「汗かき」現象（いつえきしんじゆん 溢液浸潤、図 1 B）・体積の低下を伴って、雌しべ細胞との接着面に溜まった溢液の上で各花粉が「起き上がりこぼし」状に前後・左右に揺れる。この運動の結果、接着位置が決まり、発芽、花粉管を伸長させる。
- ・イネ花粉粒由来の溢液には、主成分となる高濃度の糖の他、脂肪酸、グルタチオン・アスコルビン酸を含むレドックス関連代謝産物等が含まれ、これら溶質は溢液の粘性増加と受粉後の雌しべ細胞の細胞壁空間における浸透圧・分子シグナリングに関与する。
- ・本知見は、イネの雌しべ上での花粉粒の接着プロセスを解明しており、温暖化環境下での米生産の安定化につながる重要な知見である。また、自殖性のイネ科植物に共通する物理現象である可能性から植物生理学・遺伝学的にも重要な基礎知見である。

研究の背景と経緯

近年、世界各地で熱波・干ばつが多発しており、穀物であるイネ科作物を中心に生産の不安定化が起きています。世界人口の消費カロリーの約 50%を依存するイネでは、開花期に高温に遭遇すると、受精障害（以下、「こうおんふねん 高温不稔」と呼称）が起こり、収量が不安定化することが懸念されています。近年、国内のイネ生産現場においても、開花期に高温不稔を誘導する気温の閾値とされる気温 35℃を上回る極端な高温の発生が続いています。開花期に高温に遭遇すると、ちみ 籾の中の玄米が実らないため、圃場の中で穂が直立したまま成熟期を迎えます。現在、この高温不稔が一般の農家圃場でも散見されており、収穫量が低下するケースも報告されるまでになっています。イネの高温不稔の要因として、これまで、開花期の高温で起こる葯中の花粉の代謝変化、葯の裂開程度についての品種間差、さらには、高温下で受粉すると、雌しべ上に付着する花粉数が減少することから稔実が低下することなどが報告されてきています。特に、受粉時の雌しべ上に接着する花粉数低下の要因は依然不明のままです。

一般に、被子植物の受粉過程において、葯の裂開後、成熟した花粉粒は風による飛散、または誘因された昆虫の媒介により雌しべの柱頭に付着（受粉）します。雌しべ乳頭細胞上に付着後、花粉粒と乳頭細胞上が接する境界部にポレン・フットと呼ばれる構造体が形成され、ポレン・フットを介する雌しべからの急激な水流入により花粉粒の体積が増加し（花粉水和）、発芽、花粉管伸長に至ります（図1）。

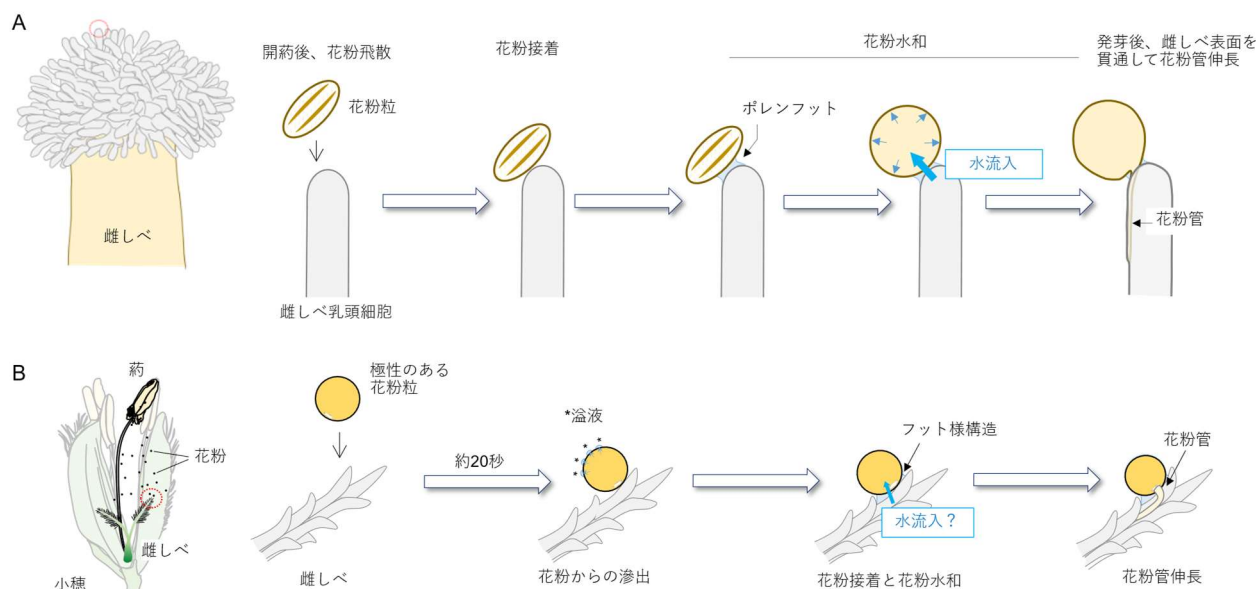


図1．一般的な被子植物の受粉プロセス（A：シロイヌナズナ）とは対照的な溢液浸潤を伴うイネの受粉プロセス(B)．

対照的に、イネ科植物の受粉プロセスは、上述の一般的な被子植物のそれとは異なり、受粉後程なくして花粉粒表面から「発汗（汗かき）」のような溢液浸潤が起こることが、1955年に報告されています¹⁾（図2参照）。しかし、この溢液浸潤を伴うイネ科植物特有の受粉様式について、今日に至るまでほとんど注目されてきませんでした。また、ピコリットルという超微量試料の成分同定もこれまで技術的に困難であったことから、溢液試料中の化学組成は不明のままでした。そのため、成分も含めたイネ科花粉粒の受粉プロセスは明らかになっていませんでした。

研究の内容

本研究では、イネ（品種、コシヒカリ）の受粉の溢液浸潤時の花粉粒の動態、特に経時的な体積変化に着目し、雌しべ上での花粉粒の挙動を調査しました。その結果、イネ花粉粒は花粉溢液の分泌に伴い、体積低下を伴って前後、左右に揺れ、雌しべ細胞上の溢液の上で転がりおもちゃのように振舞うことを発見しました（図2、Supplementary Movie 1及び2を参照）。この動きにより各花粉粒は雌しべ上で自己位置を最適化し、花粉付着、発芽、花粉伸長に至ることが強く示唆されました（図2、Supplementary Movie 1及び2を参照）。

また、花粉粒上部から撮影したモーション解析において、花粉粒の振り子運動時に認められた迂回モーションから、溢液のもつ表面張力もその運動に寄与していることが示されました（図2）。一般に、あらゆる物体の動きには加速が必要です。おもちゃの「起き上がりこぼし」の動きの場合、球体部分の重心を移動させることによる重力加速度に応じて回転します。これと同じメカニズムが、受粉後の花粉粒で起きていることが明らかとなりました。

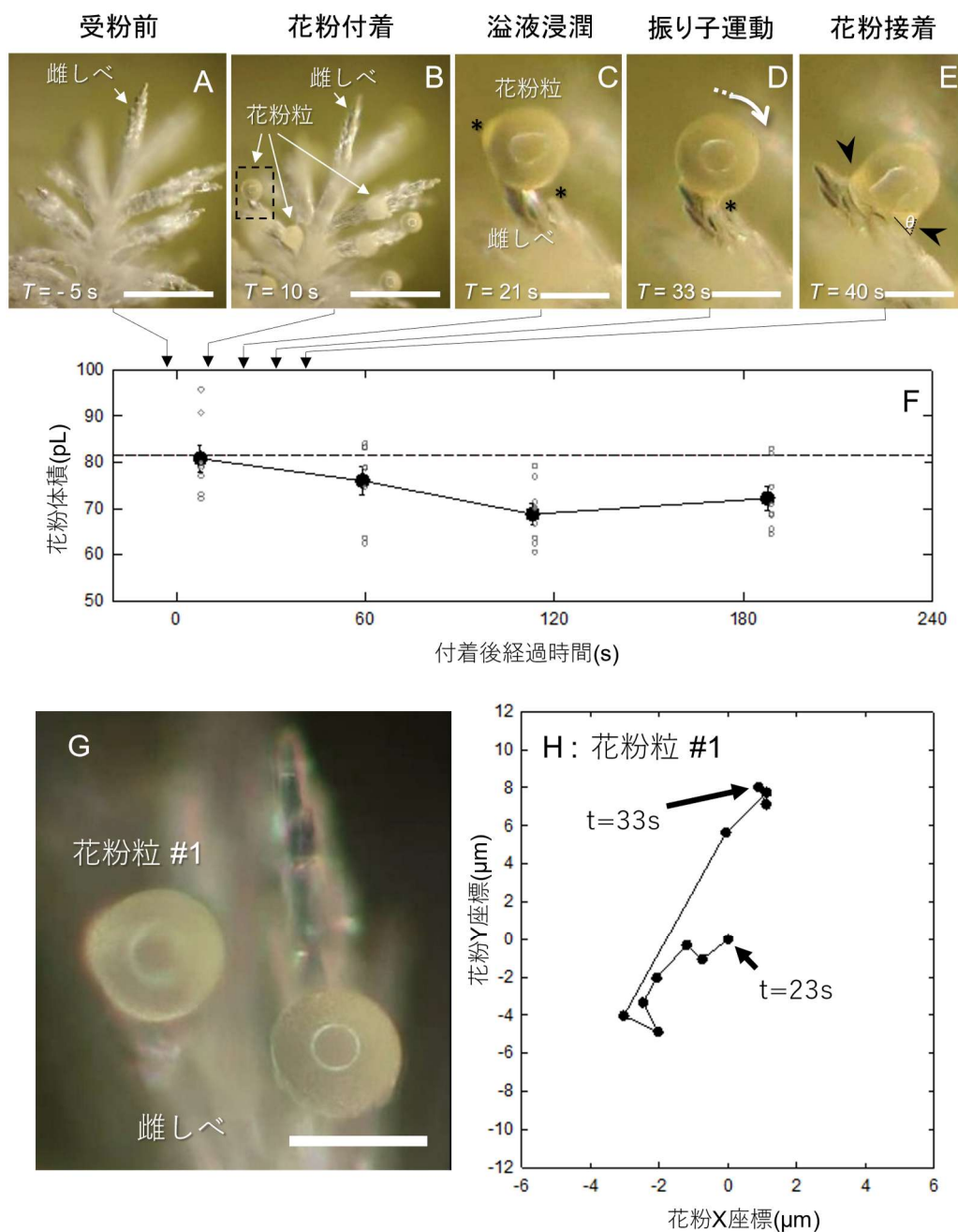


図 2. 高倍率顕微鏡により観察した人工授粉後のイネの雌しべ・花粉粒の画像 (A-E)、受粉後の花粉粒体積の経時変化 (F) 及び、花粉粒の上部からの撮影 (G) による運動時の花粉粒の軌跡 (H)。

人工授粉後、約 20 秒後 (花粉粒 #1 では 23 秒後) に開始する溢液浸潤に続いて、振り子運動を生じた後、花粉粒の接着 (ポレン・フット形成) に至る。受粉後約 2 分後に花粉粒の体積増加を確認 (F)。H は花粉粒 #1 における花粉粒の運動の一例。図 A・B、C-E、F のバーの長さはそれぞれ、200 μ m、40 μ m、50 μ m を示す。

加えて、1 細胞代謝産物計測手法であるピコリットル・プレッシャープローブ・エレクトロスプレーイオン化質量分析法^(注 2)を用いて、生育中の状態で受粉後分泌されるピコリットル量の花粉溢液試料をキャピラリー管内に直接採取し、オンサイトかつリアルタイムにこの超微量試料に含まれる代謝産物を一

斉解析しました²⁾。さらに、同様の方法で成熟花粉粒、雌しべ細胞それぞれから採取した細胞液成分を対象に代謝産物計測を行い、成分比較を行いました（図3 A-C）。

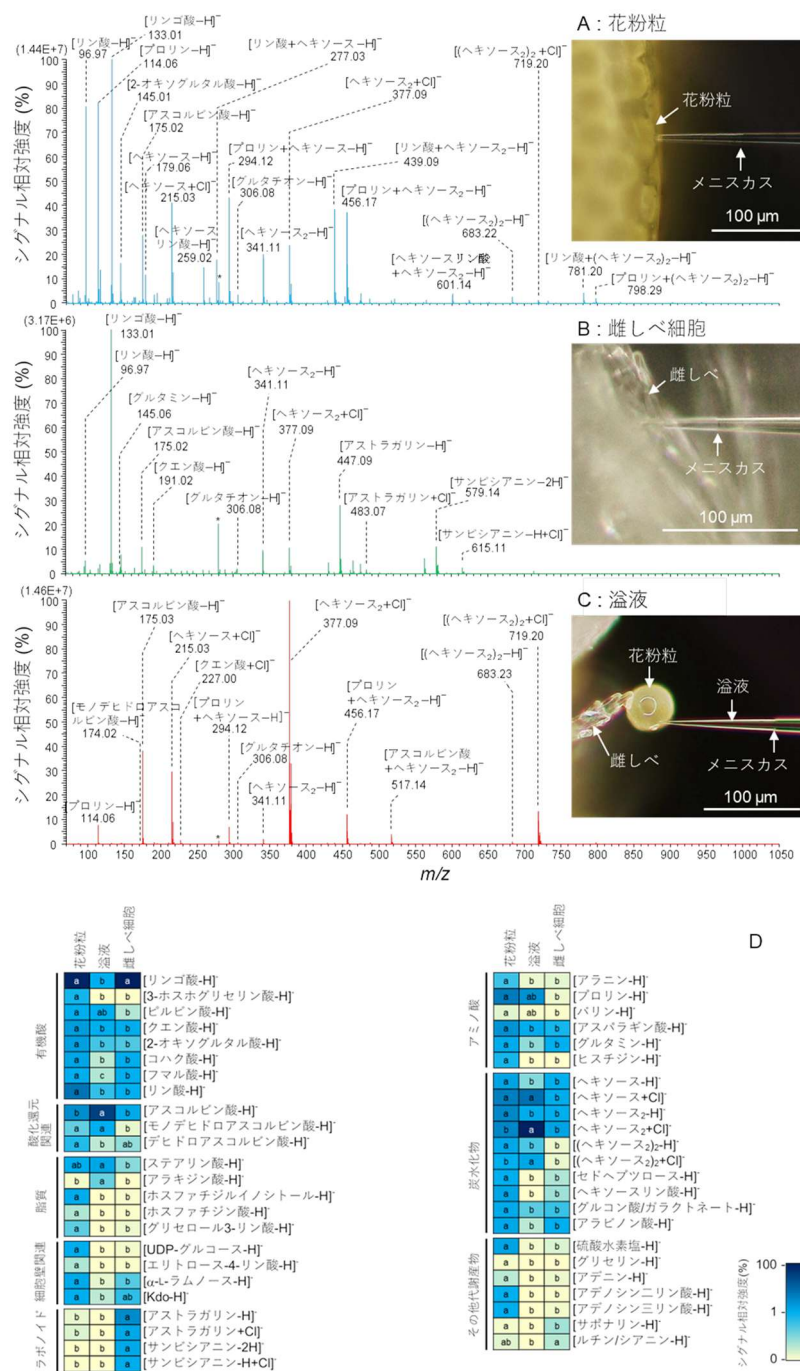


図 3. イネ 1 成熟花粉粒 (A)、1 乳頭細胞 (B)、花粉溢液 (C) のマススペクトル、主要代謝産物のヒートマップ (D)。図中の異なるアルファベットは有意差があることを示す。星印はバックグラウンドシグナル。

溢液の主成分として浸透圧に貢献する高濃度の糖類の他、脂肪酸、グルタチオン・アスコルビン酸を含むレドックス関連の代謝物を始めとする多数の溶質が検出されました（図3 C）。また、溢液の成分組成は、成熟花粉粒、雌しべ細胞由来の細胞液の化学組成とは全く異なるパターンを持つことも確認されました（図3 D）。受粉後 2 分間、花粉粒体積が低下を続け、溢液浸潤の過程で花粉粒体積が約 15% 減少したこと、また、雌しべとの接触なしにイネ花粉粒は発芽、花粉伸長に至ることから、少なくとも受粉後

2 分間は雌しべ由来の水摂取がなく、溢液は花粉粒自体から分泌されたものであることが示唆されました。また、雌しべ細胞から、糖、アミノ酸、脂肪酸とともに、アストラガリン、サンビシアンニン等のフラボノイド配糖体の強いシグナルも検出されました。

以上の結果から、

- ① 溢液浸潤後、物理化学的な相互作用により花粉粒と雌しべ細胞の接触部分において表面張力・吸着力が形成されます。今回発見された「起き上がりこぼし」状の運動（振り子運動）は花粉粒の重心が下方移動することによって働くことが強く示唆されました。
- ② イネ花粉粒の溢液浸潤に続いて起こる振り子運動は、迅速なイネの受精の前提条件として、雌しべ上での各花粉粒の自己位置決定・接着に密接に関与し、高温不稔の一要因であることが示唆されました。
- ③ 溢液の組成は1花粉粒・雌しべ細胞それぞれの化学組成とは異なり、粘性増大に寄与し、雌しべとの接触後の雌しべ細胞の細胞壁空間における浸透圧・分子シグナリングに関わっている可能性が強く示唆されました。

一般に、双子葉植物の花粉粒の発芽孔は3つあるのに対して、イネ科植物を含む単子葉植物の花粉粒の発芽孔数は1つであることが知られています。本研究では、見出された「起き上がりこぼし」運動の機作について、過去の文献も踏まえ、以下のような「花粉粒内のオルガネラ再配置による重心移動説」を提唱しています。

受粉後、イネ花粉粒内では、核・澱粉粒の重力に沿ったオルガネラ再配置により、花粉粒の重心が下方移動するとともに、溢液浸潤により花粉粒と雌しべ細胞との接点に溢液が蓄積することで、溢液が潤滑剤の役割を果たしながら、花粉粒に振り子運動を生じさせます。この振り子運動により、イネ花粉粒表面に1つある発芽孔の位置を最適位置まで近付けたうえで、花粉粒が雌しべ細胞に接着することで、確実な発芽・花粉管伸長を誘導していると考えられます（図4）。

今後の展開

風媒花であるイネの雌しべ上への花粉粒の接着の良し悪しは受精の初期プロセスとして生理学的に重要なステップです。本研究は、詳細な顕微鏡観察と1細胞生体計測技術を駆使し、長年世界的に認知されてこなかったイネ科植物の花粉における溢液浸潤について、植物水分生理学的な観点から、水の動き・代謝変化について検証しました。その結果、イネの受粉プロセスにおける花粉粒特異的な「起き上がりこぼし」運動の発見につながりました。また、この運動を引き起こすであろう「花粉粒内のオルガネラ再配置による花粉粒の重心移動説」を提唱するに至っています。

本研究で見出されたイネ受粉時の花粉溢液浸潤・振り子運動は、長年に渡るイネの栽培化の過程で短時間の間に自家受粉を完了させるためにイネが獲得した形質である可能性があり、イネ科植物に共通する機構として、自然界及び交配時に同様のメカニズムが働いていることが推測されます。本知見は、開花期の高温に伴って発生する高温不稔の現象を解明するうえで重要な基礎知見です。今後の研究推進により、開花時の高温に対して、高次の耐性を備えた品種育成の加速が期待されます。

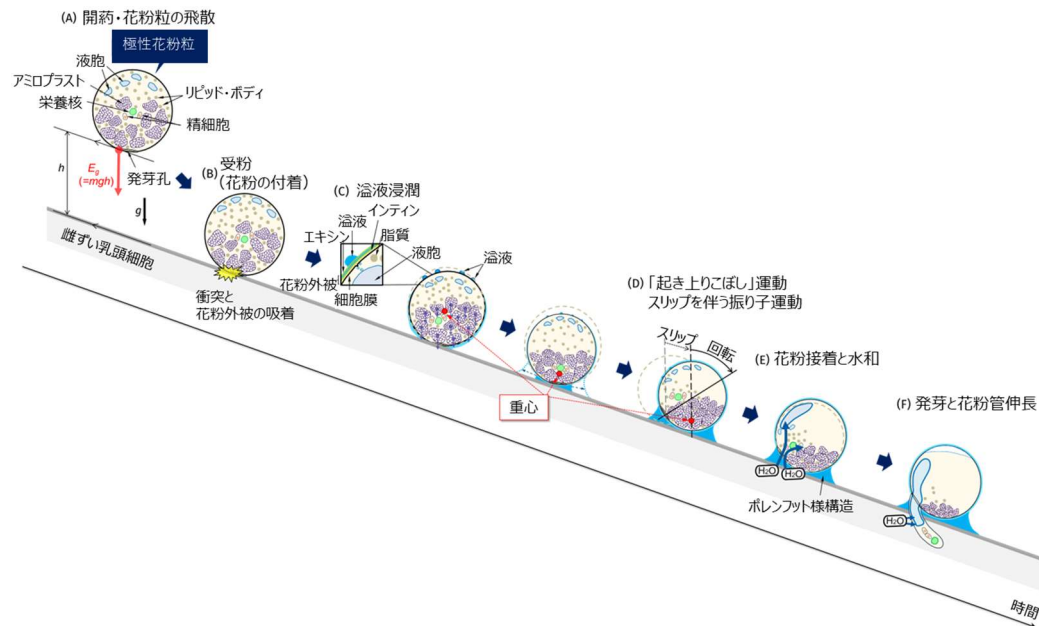


図 4. イネ花粉粒の「起き上がりこぼし」様運動と推定上の「オルガネラ再配置による花粉粒の重心移動説」

A) イネの開葯・花粉粒の飛散後、B) 極性を持つ花粉粒は雌しべ表面に衝突、花粉外被は雌しべに付着。C) 付着して約 20 秒後に溢液浸潤が開始、溢液が雌しべとの間の界面に達した後、D) 花粉粒の「起き上がりこぼし」様の振子運動の発生、E) 花粉の接着と水を経て、F) 花粉粒の発芽・花粉管伸長に至る。核・澱粉粒を中心とする重力に沿ったオルガネラ再配置により、花粉粒の重心が下方移動するとともに、溢液浸潤により花粉粒と雌しべ細胞との接点に溢液が蓄積することで、溢液が潤滑剤の役割を果たしながら、花粉粒に振り子運動を生じさせる。この振り子運動により、イネ花粉粒表面に 1 つある発芽孔の位置を最適位置まで近付けたうえで、花粉粒が発芽することで、迅速な花粉管伸長を誘導する。簡略化のため、各図におけるオルガネラ構造として、花粉粒内の 3 核、澱粉粒、リポッドボディ、液胞様構造のみ示し、膜構造等他の要素については割愛。

用語解説

注 1 ^{いつえき} イネ科の花粉粒の溢液現象： 1955 年に Watanabe によって報告されたイネ科植物の受粉プロセスの初期に起こる花粉粒の溢液現象（Pollen exudation）。イネ花粉粒表面から多量の水分が排出されることから、渡辺氏はこの現象を花粉粒の「汗かき」と表現。当時、溢液現象は接着時の雌しべ由来の水摂取によるものと推定された。

注 2 ピコリットル・プレッシャープローブ・エレクトロスプレーイオン化質量分析法

生きている植物細胞の一部の細胞溶液を採取後、これをエレクトロスプレーイオン化し、オービトラップ質量分析計で分析することで、高感度かつ高精度な代謝プロファイリングを可能にする 1 細胞メタボローム解析法。1 細胞水分状態計測器として知られるプレッシャープローブを搭載することで、標的細胞からピコリットルスケールの超微量試料が採取可能。この方法を用いて、本研究では花粉溢液の他、1 花粉粒・1 雌しべ細胞、それぞれから採取した微量試料に高電圧を直接印加することにより、前処理の必要なくリアルタイムに代謝産物の質量分析を行っている。なお、本手法は愛媛大学の当グループで開発された手法（Nakashima *et al.* 2016, 下記文献参照）である。

参考文献

- 1 . Watanabe, K., Studies on the germination of grass pollen I: Liquid exudation of the pollen on the stigma before germination. *Bot. Mag. Tokyo.* **68**, 40-44 (1955), <https://doi.org:10.15281/jplantres1887.68.40>
- 2 . Nakashima, T. *et al.* Single-cell metabolite profiling of stalk and glandular cells of intact trichomes with internal electrode capillary pressure probe electrospray ionization mass spectrometry. *Anal Chem* **88**, 3049-3057 (2016), <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.analchem.5b03366>