

植物による熱産生メカニズムの一端を解明 ～ミトコンドリアを豊富に含む細胞が、熱産生への鍵～

【ポイント】

- ・ 発熱ステージの移行に伴う花の発達変化を、細胞レベルでとらえることに成功。
- ・ 植物の熱産生には、発達したミトコンドリアが豊富に含まれていることが重要。
- ・ 耐寒性作物の育種などに新たな知見を提供。

【要約】

稲葉靖子（岩手大学農学部附属寒冷バイオフィロンティア研究センター 研究員）、豊岡公徳（理化学研究所 植物科学研究センター 機能開発研究グループ 研究員）、渡辺正夫（東北大学大学院生命科学研究科 植物生殖遺伝分野 教授）らのグループは、サトイモ科の発熱植物であるザゼンソウを材料として、発熱ステージの移行に伴う発熱器官（肉穂花序）の発達変化を細胞レベルでとらえることに成功しました。また、発熱レベルの異なる植物組織同士の比較により、植物の熱産生には発達したミトコンドリア^注が豊富に含まれていることが重要であることを明らかとしました。

ザゼンソウは寒冷地に自生する唯一の発熱植物であり、氷点下を含む寒冷環境下においても発熱器官である肉穂花序の体温を約 20℃前後に保つことができます。安定した発熱が1～2週間にわたって観察できるザゼンソウは、植物の熱産生機構を理解する上で重要な植物です。今後、植物細胞の中でミトコンドリアが豊富に含まれる仕組みを解明することにより、耐寒性作物の育種などに新たな知見を提供することが期待できます。

本研究成果の詳細は、9月4日付けで英国の科学雑誌「*Journal of Experimental Botany*」の60巻13号にオンライン掲載される予定です。なお、同研究チームの研究成果が本雑誌の表紙に採用されることが決定しています。

【注：ミトコンドリア】

細胞の呼吸をつかさどる重要な細胞内小器官であり、細胞が生きていくために必要なエネルギー（ATP）を供給する。動植物を問わず発熱する組織では呼吸が活発であり、ミトコンドリア呼吸が熱産生に重要な役割を担っている。熱産生機構については不明な点が多いが、余剰エネルギーの解消にかかわるミトコンドリア内膜タンパク質が、電子伝達鎖と協調して発熱に関与しているのではないかと考えられている。動物の発熱組織では、ミトコンドリアが豊富に含まれていることが知られており、研究グループによる今回の発見は、動物における発熱の分子機構と類似の機構が植物にもあることを示唆する結果である。

【論文題目】

Developmental changes and organelle biogenesis in the reproductive organs of

thermogenic skunk cabbage (*Symplocarpus renifolius*).

Journal of Experimental Botany オンライン版 (9月4日付け)

「発熱植物ザゼンソウの生殖器官における発達変化とオルガネラ動態」

【本研究内容についてコメントできる方】

山谷知行 教授 東北大学 大学院農学研究科 植物細胞生化学分野

電話：022-717-8789

E-mail：tyamaya@biochem.tohoku.ac.jp

鳥山欽哉 教授 東北大学 大学院農学研究科 環境適応生物工学研究室

電話：022-717-8830

E-mail：torikin@bios.tohoku.ac.jp

【本プレスリリースに関する問い合わせ先】

稲葉（伊東）靖子 岩手大学農学部附属寒冷バイオフィロンティア研究センター

電話：019-621-6201 FAX：019-621-6200

E-mail：ykoito@iwate-u.ac.jp

補足説明資料

【研究の背景・ねらい】

サトイモ科の発熱植物として知られるザゼンソウ（図 1）は、寒冷地に自生する唯一の発熱植物であり、氷点下を含む寒冷環境下においても発熱器官である肉穂花序の体温を約 20℃前後に保つことができる。ザゼンソウの他に約 20 種類のサトイモ科発熱植物が知られているが、他の発熱植物が 1～2 日以内に発熱を終えるのに対して、ザゼンソウは 1～2 週間にわたって発熱し続けるため、植物の熱産生機構を理解する上でザゼンソウは重要な植物である。

ザゼンソウの発熱器官である肉穂花序は 4 つの組織（花弁、雌しべ、雄しべ、維管束）からなっており、花弁、雌しべ、雄しべから成る小花 100 個あまりが維管束組織の表面に集合した構造をとる（図 2）。肉穂花序の分化ステージは発熱ステージとともに移行して、発熱の活発なメス期から発熱能力を持たないオス期へと移行する。メス期では雌しべの先（柱頭）が花序の表面に突き出ており、オス期になると雄しべの先（葯）が表面に出てきて花粉が放出される。熱産生機構を理解するうえで、発熱と密接に関連する花の発達変化を理解することは重要と思われるが、花の発達変化に伴う組織および細胞形態の変化に関する知見は意外なほどに少ない。また発熱する組織では呼吸が活発であることから、ミトコンドリアは発熱に関与する重要な細胞内小器官であると考えられているが、発熱する組織におけるミトコンドリアの動態についてはまったく不明である。そこで本研究では、植物における熱産生機構の解明を目指して、花の発達変化に伴う各組織の形態変化を組織および細胞レベルで詳細に観察し、細胞内構造の観察では特にミトコンドリアの動態に着目して研究を行った。

【成果の内容・特徴】

ザゼンソウ肉穂花序の輪切り切片を詳細に観察したところ、活発に発熱するメス期の肉穂花序では、雄しべの葯内部での形態変化が著しく、タペート層の崩壊、アメーバ状多核細胞（ペリプラスモディウム）の出現、小孢子から花粉への成熟化、といった多くの変化が観察された（図 3）。花弁、雌しべ、維管束の各組織については、花の発達変化にともなう少しずつ成長していったが、雄しべほどの著しい形態変化は見出されなかった。ザゼンソウの肉穂花序を構成する各組織（花弁、雌しべ、雄しべ、維管束）を分離して、電子顕微鏡（TEM）による観察を行ったところ、雄しべの小孢子において、細胞内ミトコンドリア密度が他組織に比べて高いこと、花弁と雌しべにおいては発熱ステージであるメス期から発熱の終了したオス期への移行にともなうミトコンドリアの量が減少すること、などが明らかとなった（図 4）。発熱への関与が示唆されているシアン耐性呼吸酵素 AOX と脱共役タンパク質 UCP についてタンパク質の発現を解析したところ、雄しべにおける発現が他の組織を上回っていた。ザゼンソウの肉穂花序は、非発熱植物であるポテトやカリフ

ラワーに比べてミトコンドリアを豊富に含んでおり、単離ミトコンドリアの呼吸活性もザゼンソウ肉穂花序の方がほかの非発熱植物の組織に比べて高かった（図 5）。以上の結果から、メス期の肉穂花序では雄しべ内部で著しい形態変化が起こること、また発熱する植物組織ではミトコンドリアが豊富に含まれていることが明らかとなった。

【成果の意義と今後の展望】

本研究の意義は、発熱植物であるザゼンソウを材料として、発熱ステージの移行に伴う発熱器官（肉穂花序）の発達変化を細胞レベルでとらえたこと、また、植物の熱産生には発達したミトコンドリアが豊富に含まれていることが重要であるという、新しい知見を提供したことにある。一般的に、植物細胞は動物細胞に比べてミトコンドリアの量が少ないため、ミトコンドリアを豊富に含むザゼンソウの発熱組織は植物ミトコンドリア研究の重要なツールとなる可能性がある。今後、植物細胞の中でミトコンドリアが豊富に含まれる仕組みを解明することにより、耐寒性作物の育種などに新たな道が開けることが期待される。

【補足説明】

タペート層：小孢子或いは花粉を含む葯室を取り囲む一層の細胞層。花粉成熟に必要な物質を供給する。ザゼンソウのタペート層は比較的初期に崩壊し、各タペート細胞が融合して多核の細胞であるペリプラスモディウムに変形する。

シアン耐性呼吸酵素 AOX：AOX (alternative oxidase) はミトコンドリア電子伝達鎖内のユビキノンから電子を受け取って、最終的に酸素を水にまで還元する。過剰な電子供給による余剰エネルギーを解消する過程で熱が発生すると考えられている。AOX と熱産生との関係は、ブードゥーリリーと呼ばれる発熱植物において最初に提唱された。

脱共役タンパク質 UCP：UCP (uncoupling protein) はミトコンドリア内膜の内外に形成されたプロトン濃度勾配を積極的に解消するため、本来 ATP 合成に共役されるべきエネルギーを熱として放出するのではないかと考えられている。UCP と熱産生との関係は、動物褐色脂肪組織の非ふるえ熱産生機構において、多くの報告がなされている。

【研究代表者】

岩手大学農学部附属寒冷バイオフィロンティア研究センター 研究員 稲葉（伊東）靖子

【研究担当者】

岩手大学 大学院連合農学研究科 プロジェクト教員 稲葉丈人

理化学研究所 植物科学研究センター 機能開発研究グループ 研究員 豊岡公德

理化学研究所 植物科学研究センター 機能開発研究グループ 技師 佐藤繭子

東北大学大学院生命科学研究科 植物生殖遺伝分野 教授 渡辺正夫

東北大学大学院生命科学研究科 植物生殖遺伝分野 技術補佐員 増子潤美

【研究協力者】

岩手大学農学部附属寒冷バイオフィロンティア研究センター 研究員 飛田耶馬人

※本研究は、産業技術研究助成事業、岩手大学 21 世紀 COE プログラム、科学研究費補助金の助成を受けて行われました。



図1 群落地に自生するザゼンソウ

(左) 可視カメラによる撮影画像、(右) 赤外線サーモグラフィによる撮影画像。

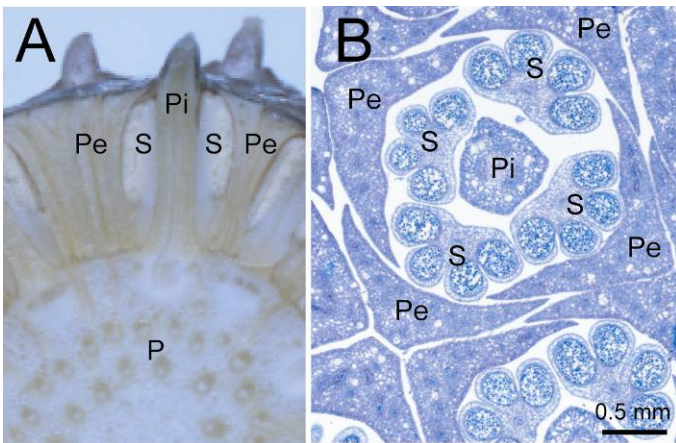


図2 肉穂花序内部の構造

(A) 輪切りした花序の画像、
(B) トルイジンブルーOで染色した花序表面の切片画像。

Pe:花弁、S:雄しべ、Pi:雌しべ、
P:維管束。

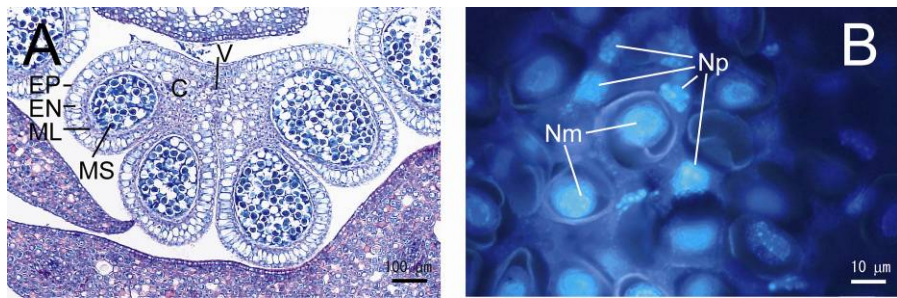


図3 メス期肉穂花序の雄しべ先端（葯）の詳細構造

(A) トルイジンブルーOで染色した画像、(B) DAPIで染色した画像。

V:維管束、C:結合組織細胞壁、MS:小孢子、EP:表皮、EN:葯内皮、ML:中間層、Np:ペリプラスモディウムの核、Nm:小孢子の核。

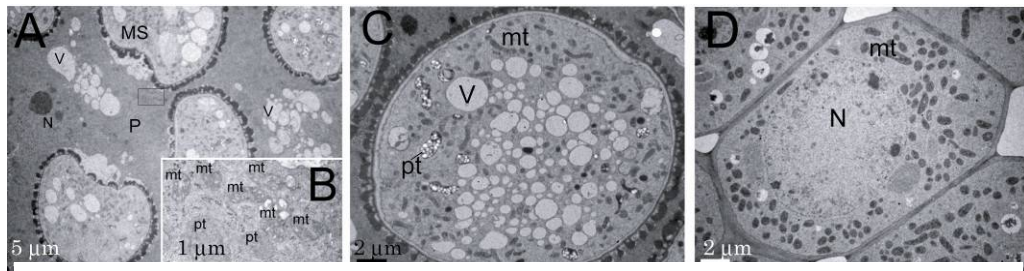


図4 電子顕微鏡 TEM で撮影したザゼンソウのミトコンドリア

(A)雄しべ葯内部の小孢子(MS)を取り囲むペリプラスモディウム(P)、(B)画像(A)の中心にある四角内の拡大画像、(C)小孢子、(D)花卉。

mt: ミトコンドリア、pt: プラスチド、V: 液胞、N: 核。

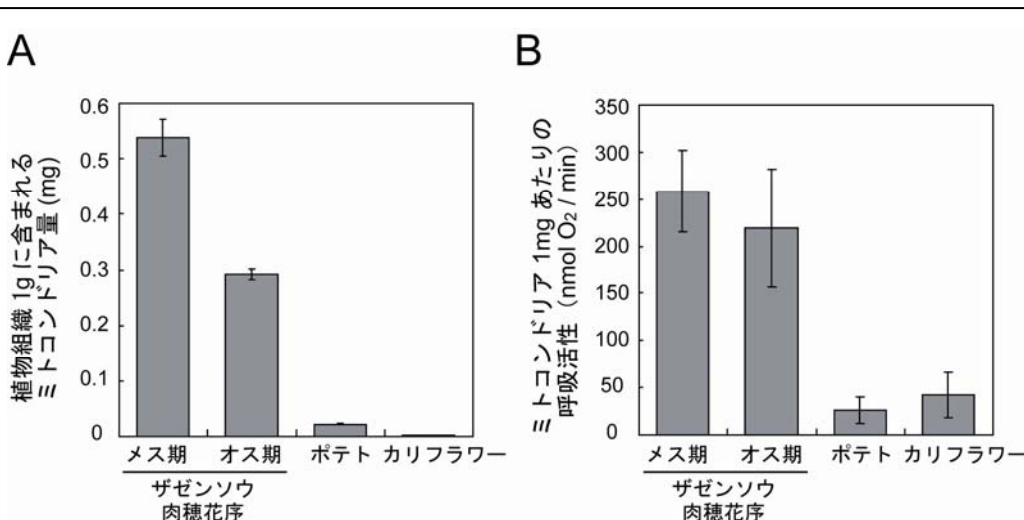


図5 発熱植物ザゼンソウと非発熱植物（ポテト、カリフラワー）との比較。

(A)ミトコンドリアの量、(B)単離したミトコンドリアの呼吸活性。