

II-2. 事業担当者

作成者	所属（専攻）・氏名 連合農学研究科生物資源科学専攻 伊藤 菊一 連絡先（内線・メール）内線 6143 E-mail : kikuito@iwate-u.ac.jp
研究課題名 （英訳名）	植物の発熱制御機構に関する研究 Thermoregulation in plants
研究分野及びキーワード	研究サブグループ：植物の熱制御システム 研究キーワード：（発熱植物）（温度制御）（発熱誘導因子）
研究協力者 （氏名・所属等）	伊東 靖子（COE 研究員） 恩田 義彦（連合農学研究科生物資源科学専攻博士課程 1 年）
<p>研究成果報告</p> <p>目的</p> <p>ザゼンソウは寒冷環境において積極的に発熱し、その体温を能動的に制御できる唯一の植物である。本研究においては、「外部から入力された熱エネルギー変化がザゼンソウ植物体においていかに受容され、その情報を生体がどのように熱エネルギー応答として変換しているのか？」という問題に対し、様々な解析を行い、本植物の発熱制御システムを明らかにすることを目的にしている。</p> <p>研究結果</p> <p>ザゼンソウ非線形ダイナミクス</p> <p>今年度の研究においては、昨年度から引き続き解析を継続していたザゼンソウ発熱現象の非線形ダイナミクスが“Zazen attractor”と名付けたストレンジアトラクタにより特徴付けられることを突き止め、当該成果を、Physical Review E に発表した (Ito & Ito, 2005)。本研究成果は、植物における世界初のカオス現象の発見を含むものである。本原著論文は、米国物理協会 Physics News Update、Science Online News、英誌 NewScientist、および、仏誌 Pour la Science に紹介され、世界的にも高く評価された。</p> <p>ザゼンソウ肉穂花序における発熱制御因子の生化学的解析</p> <p>ザゼンソウの熱制御システムに関わる生物的因子については、ミトコンドリアに局在する脱共役タンパク質に着目した研究を進め、SfUCPb と命名した新しい因子が、本植物の高い熱産生メカニズムに密接に関連していることを示す結果を得た。ミトコンドリアにおいては、電子伝達により内膜を挟んで形成された電位勾配の解消と共役して、ATP 合成酵素による ATP 産生が行われている。ところが、脱共役タンパク質（Uncoupling protein: UCP）と呼ばれる因子を発現するミトコンドリアにおいては、本因子がプロトン輸送体として膜内外の電位勾配を打ち消すため、電子伝達系と ATP 合成とが脱共役し、本来 ATP 合成に共役されるべきエネルギーが熱として放出される（図 1）。UCP はミトコンドリアキャリア蛋白質に典型的な 6 個の膜貫通ドメインを持つ膜蛋白質であり、哺乳動物における代表的な UCP 分子である UCP1 については、トランスジェニックマウスやノックアウトマウスの解析を通じてその熱産生における機能が明らかにされている。一方、ザゼンソウにおいては、その発熱器官である肉穂花序において、SfUCPa および SfUCPb と名付けられた 2 種類の UCP 因子をコードする遺伝子が発現していることが判明していた。興味深いことに、SfUCPb は、従来型 UCP の第 5 番目の膜貫通ドメインを完全に欠失している新規 5 回膜貫通型 UCP である（図 2）。肉穂花序において発現している 2 種類の UCP 関連遺伝子のタンパク質レベルにおける発現を解析するため、長野県白馬村の群落地において、発熱しているザゼンソウから肉穂花序を採取し、その日のうちに、盛岡の研究室に持ち帰り、肉穂花序の発熱組織である小花からミトコンドリアの精製を行った。最終的には 800 個体のザゼンソウ肉穂花序（3 kg）から 750 mg のミトコンドリア標品を得た（図 3）。ザゼンソウ肉穂花序のミトコンドリアにお</p>	

けるUCPタンパク質の発現解析得られたミトコンドリア画分における2種類のUCPタンパク質(SfUCPaおよびSfUCPb)の発現をウエスタン法により解析した。本解析に用いた抗体は、SfUCPaおよびSfUCPbのC末を特異的に認識する抗UCPペプチド抗体である。その結果、肉穂花序において主に発現しているUCP分子は、第5番目の膜貫通ドメインが欠失したSfUCPbであることが判明した(図4)。従来報告されているUCP分子において、SfUCPbのような第5番目の膜貫通ドメインが欠失したUCPは例がない。また、一般的に6回膜貫通型の構造を有するミトコンドリアキャリアタンパク質においても、その第5番目の膜貫通ドメインが欠失したような分子構造を有する因子は知られていない。通常、UCP分子はミトコンドリア内膜に局在し機能するとされている。しかしながら、新規のミトコンドリア因子であるSfUCPbがミトコンドリア内膜で機能するとの保証はない。そこで、SfUCPbがミトコンドリアにおける局在部位に関する生化学的解析を行うこととした。具体的には、ミトコンドリア標品に対し、 Na_2CO_3 およびTritonX-100処理を行い、SfUCPbが膜タンパク質であるか否かを検討した。その結果、SfUCPbは、 Na_2CO_3 処理では沈殿画分に、Triton X-100処理においては、可溶性画分に回収されることが判明し、膜にインテグレートされたタンパク質であることが強く示唆された(図5A)。さらに、SfUCPbがミトコンドリアの内膜に挿入された因子であるか否かを明らかにするため、TrypsinとTriton X-100処理を組み合わせた解析を行った。その結果、SfUCPbは単なるTrypsin処理に対しては分解されないが、Triton X-100との組み合わせにより消化されることが判明し(図5B)、その局在部位は、ミトコンドリア内膜であることが推定された。ザゼンソウ肉穂花序由来のミトコンドリアにおける脱共役活性の解析これまでの結果から、ザゼンソウの肉穂花序で主に発現している新規5回膜貫通型SfUCPbは従来報告されているUCP因子群と同様、そのミトコンドリア内膜において脱共役タンパク質として機能することが予想される。すなわち、ミトコンドリアにおける電子伝達鎖により生じたプロトン濃度勾配をATP合成と共役することなく解消し、そのelectrochemical potentialを熱エネルギーとして放逸している可能性が高い(図6)。そこで、SfUCPbの機能としての脱共役活性がザゼンソウ肉穂花序由来のミトコンドリアで観察されるか否かを検討することとした。具体的な実験は、クラーク型酸素電極を用いた呼吸活性の測定により行った。すなわち、ミトコンドリア標品に対し、コハク酸を基質とする呼吸を誘導し、respiratory control ratioおよびADP/O ratioを算出することにより、その脱共役活性を評価した(図7)。なお、対照実験として、ザゼンソウSfUCPbとは異なる6回型膜貫通ドメインを有するUCPが発現していることが知られているポテト塊茎由来のミトコンドリアを用いた解析を行った(図8)。その結果、ザゼンソウ肉穂花序ミトコンドリアにおいては、高い脱共役活性に由来すると考えられるRC ratioの低下と、ADP/O ratioの減少が観察された(図8)。これらの結果は、ザゼンソウ肉穂花序で主に発現している5回膜貫通型SfUCPbが、ポテト塊茎において発現している6回膜貫通型StUCPよりも、高い脱共役活性を有していることを示唆している。本年度の研究により、ザゼンソウ肉穂花序においては、SfUCPbがその熱産生に密接に関連している可能性が出てきた。一般にUCP分子を含むミトコンドリアキャリアタンパク質は6回膜貫通型の分子構造を有することが知られているが、今回はじめて明らかになったように、その5番目の膜貫通ドメインを特異的に欠失したSfUCPbがザゼンソウのミトコンドリアにおいて熱産生原因因子として機能していることが予想される(図9)。今後の問題として非常に興味深い点は、ザゼンソウ肉穂花序で機能しているSfUCPbがどのような分子メカニズムによりその熱産生をサポートしているかという点である。従来知られている6回膜貫通型UCP分子はそのC端にプリンクレオチド結合部位(PNBD)が存在し、当該分子活性を抑制することが知られているが、ザゼンソウ由来のSfUCPbにおいてもPNBDは保存されていることから、PNBDを介した活性調節が本植物の熱制御メカニズムに密接に関連していることは想像に難くない。この点を踏まえて、来年度においては、SfUCPbを発現しているザゼンソウ肉穂花序ミトコンドリアの機能解析を継続するとともに、SfUCPbの膜トポロジーと機能相関についてより詳細な研究を進めていく予定である。

来年度以降に向けての反省点、改善すべき点、そして、対策方法

本年度は、ザゼンソウ研究成果がScience誌等の海外の著名誌により紹介され、当該研究の重要性が世界的にも理解され始めた年であった。しかしながら、ザゼンソウ研究は、その研究材料の入手等が困難であることから、まだまだ“マイナーな山野草の研究をしている”との位置付けで捉えられることも少なくなく、この点が来年度以降の改善の方策を検討すべき課題であろう。夢のような話かもしれないが、

例えば、国内にあるザゼンソウ大群落地に隣接する形で実験研究施設などを整備し、関連する研究を強力に推進できる環境が整えば、岩手大学発のザゼンソウ研究も大いに進展するだろう。この点が中長期的なザゼンソウ研究の課題である。

来年度研究計画の概略

来年度においても引き続き「外部から入力された熱エネルギー変化がザゼンソウ植物体において、いかに受容され、その情報を生体がどのように熱エネルギー応答として変換しているのか？」という問題を明らかにするための研究を行う。具体的には、SfUCPbのミトコンドリアにおける機能を生化学的手法により明らかにするとともに、本植物の発熱に密接に関与していることが予想されるシアン耐性呼吸酵素の機能についても解析を進める。また、ザゼンソウ肉穂花序ミトコンドリアが環境温度変化を認識できるか否かという問題についても検討を加え、ザゼンソウの温度センサー分子の検索実験に繋げたい。

本研究拠点形成に関連して受けた研究助成（助成金名称および金額）

生研センター 基礎研究推進事業（若手研究支援型）：44,000 千円

その他特記すべき事項

ザゼンソウのカオス現象に関わる研究成果は、著名な国際雑誌である米国物理学会誌 (*Physical Review E*) に掲載された (*Biological Physics* のカテゴリ)。本論文は、**米国物理協会の Physics News Graphics に掲載**されるとともに (2005年11月8日、<http://www.aip.org/png/2005/239.htm>)、**同協会の Physics News Update でも紹介**された (2005年11月9日、<http://www.aip.org/pnu/2005/753.html>)。その後、本論文は、**Virtual Journal of Biological Physics Research (ISSN: 1553-9628) にも掲載**された (2005年11月15日、<http://scitation.aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=VIRT02&Volume=10&Issue=10#MAJOR15>)。Virtual Journal of Biological Physics Research は、Nature、Science、PNAS などに掲載された生物物理関係の重要な論文を厳選して掲載する雑誌である。さらに、同内容は、Science 誌の編集者との数回のやりとりの後、**ScienceNow (Science のオンラインニュース) に掲載**された (2005年11月16日、<http://sciencenow.sciencemag.org/cgi/content/full/2005/1116/1>)。その後、印刷物として出版された Science でもザゼンソウ研究が ScienceNow に掲載されていることが記述されている (2005年11月25日 *Science* 310, 1239, 2005)。また、同成果は、2005年11月19日付け英国科学雑誌 **NewScientist** (<http://www.newscientist.com/channel/fundamentals/mg18825265.000.html>)、および、同年12月28日付けのフランス科学雑誌 **Pour la Science** にも掲載された (<http://www.pourlascience.com/index.php?ids=IXnGhpQYaOVvnyrNnSOH&Menu=Pls&Action=3&idn3=4961>)。上述した *Physical Review E* 掲載論文の世界的なインパクトに加え、我々の研究アプローチは国内でも反響を呼んでいる。本研究は、ザゼンソウの発熱現象をシステムとして理解しようとするものであり、アルゴリズム研究は、本植物の発熱制御機構に最も大きな影響を与えるプロセスの抽出・モデル化を意図している。さらに、得られたモデルが教える生物側の因子の特徴に従い、各種分子生物学あるいは生化学的研究を推し進めることが本プロジェクトの大きな特徴であった。この研究アプローチは、2005年12月に福岡で開催された第28回日本分子生物学会の“システム生物学とは何か”というワークショップにおいて、一般演題からただ1題だけが採択され、関連する口頭発表を行った。発表後、本ワークショップ主催者から以下のようなコメントが寄せられた。**「ザゼンソウの話は、システムを理解しようとしたときに、より抽象的なレベルでの思考が必要である点、また、物理的な解析法により何がわかるかと言うことを聴衆にわからせるために、良い例であったと思います。」**ザゼンソウを対象とした数値的研究は、特異生命現象に関わる制御メカニズムを抽出し、関連する生物因子等をより深く理解するためのユニークな研究手法として、他の生物種 (例えばゲノム情報が不明な野生植物であっても) でも活用される可能性が高いと見ている。いずれにしても、ザゼンソウを対象とした熱制御解析は、高等植物におけるカオス研究の先駆けとなるものであり、農作物等の環境適応研究においても新しい学問領域を形成する可能性がある。この点が本研究の大きなインパクトであろう。

特許

1) 伊藤菊一, 加藤喜明, 松川和重. 2005. ミトコンドリアの機能改変方法特許出願. 出願番号: 特願

2005-61168, 日本.

- 2) 伊藤菊一, 伊藤孝徳. 2005. 生体時系列信号解析装置及び生体信号解析方法特許取得. 特許番号 : 第 3658623 号, 日本.
- 3) 伊藤菊一. 2005. Thermogenesis-associated genes and thermogenesis-associated proteins of plant. 特許取得, 特許番号 : 6,927,288, 米国.
- 4) 伊藤菊一, 松川和重. 2006. 生物種のミトコンドリアにシアン耐性呼吸能力を付与する方法特許出願. 出願番号 : 特願 2006-75315 号, 日本.

大学発ベンチャー起業

- 1) 有限会社 ザゼンソウ技術開発研究所 設立 (2005 年 12 月 16 日)

研究成果

原著論文

- 1) Ito, T. and Ito, K. 2005. Nonlinear dynamics of homeothermic temperature control in skunk cabbage, *Symplocarpus foetidus*. Phys. Rev. E 72: 051909.
- 2) Onda, Y. and Ito, K. 2005. Changes in the composition in xylem sap during development of the spadix of skunk cabbage (*Symplocarpus foetidus*). Biosci. Biotechnol. Biochem. 69:1156-1161.
- 3) Ito, K. and Seymour, R.S. 2005. Expression of uncoupling protein and alternative oxidase depends on lipid or carbohydrate substrates in thermogenic plants. Biol. Lett. 1: 427-430.

著書

- 1) 伊藤菊一. 2005. 発熱遺伝子を持つ植物・ザゼンソウ. テクノカレント 404: 2-13.
- 2) 伊藤菊一. 2005. 環境負荷のないバイオの力で土壌浄化する. 地域のための環境再生読本, pp 53-60.

国際学会

- 1) Onda, Y. and Ito, K. 2005. Thermoscopic identification of thermogenic cells that co-express both *SfAOX* and *SfUCPb* genes in the spadix of skunk cabbage, *Symplocarpus foetidus*. International Congress on Plant Mitochondrial Biology, Obernai, France.
- 2) Otsuka, M., Kato, Y., Onda, Y., Matsukawa, M., Ito, Y. and Ito, K. 2005. Pyruvate-specific activation of alternative oxidase in the mitochondria of thermogenic spadix of skunk cabbage, *Symplocarpus foetidus*. International Congress on Plant Mitochondrial Biology, Obernai, France.
- 3) Ito, T., Osada, H. and Ito, K. 2005. Nonlinear dynamics of homeothermic temperature control in skunk cabbage, *Symplocarpus foetidus*. International Congress on Plant Mitochondrial Biology, Obernai, France.

国内学会

- 1) 加藤喜明, 松川和重, 伊藤菊一. 2005. 酵母発現系によるザゼンソウ脱共役タンパク質 (SfUCPa, SfUCPb) の機能解析. 日本農芸化学会 2005 年大会, 札幌.
- 2) 伊藤菊一. 2005. ザゼンソウを模倣した温度制御アルゴリズムの開発とその生物系発熱制御デバイスへの応用. 岩手大学-東北大学国際シンポジウム, 仙台.
- 3) 伊東靖子, 加藤喜明, 大塚稔, 恩田義彦, 松川和重, 伊藤菊一. 2005. ザゼンソウの熱産生に関与する脱共役蛋白質(UCP)の構造と機能に関する研究. 岩手大学-東北大学国際シンポジウム, 仙台.
- 4) Onda, Y. and Ito, K. 2005. Mitochondrial alternative oxidase and novel uncoupling protein co-express in thermogenic cells of skunk cabbage, *Symplocarpus foetidus*. 岩手大学-東北大学国際シンポジウム, 仙台.
- 5) 加藤喜明, 松川和重, 伊藤菊一. 2005. 酵母発現系による膜貫通ドメイン 5 番が欠失した脱共役タンパク質の解析. 岩手大学-東北大学国際シンポジウム, 仙台.

- 6) 松川和重, 伊藤菊一. 2005. 動物細胞における膜貫通ドメイン5番を欠失した脱共役タンパク質の発現とその機能解析. 岩手大学-東北大学国際シンポジウム, 仙台.
- 7) 大塚稔, 伊藤菊一. 2005. ザゼンソウ熱産生システムにおける植物ホルモンの役割. 岩手大学-東北大学国際シンポジウム, 仙台.
- 8) Ito, K. and Seymour, R.S. 2005. Selective expression of thermogenic genes in heat-producing plants. 岩手大学-東北大学国際シンポジウム, 仙台.
- 9) 伊藤孝徳, 高橋賢, 遠藤雄大, 千葉茂樹, 伊藤菊一, 長田洋. 2005. 発熱植物ザゼンソウの温度制御アルゴリズムとその工学的応用. 岩手大学-東北大学国際シンポジウム, 仙台.
- 10) 中島章仁, 伊藤孝徳, 鳥巢諒, 伊藤菊一. 2005. 決定論的非線形予測手法を用いたハスの発熱現象の解析. 岩手大学-東北大学国際シンポジウム, 仙台.
- 11) Ito, K., Abe, Y., Johnston, S.D. and Seymour, R.S. 2005. Isolation of a gene encoding uncoupling protein from the thermogenic inflorescence of the dead horse arum *Helicodiceros muscivorus*. 第6回日本農芸化学会東北支部若手シンポジウム, 鶴岡.
- 12) 伊東靖子. 2005. 大腸菌リポ蛋白質選別輸送を担うABCトランスポーターの反応機構. 第6回日本農芸化学会東北支部若手シンポジウム, 鶴岡.
- 13) 恩田義彦, 松川和重, 加藤喜明, 伊藤菊一. 2005. ザゼンソウの発熱細胞におけるシアン耐性呼吸酵素と新規脱共役タンパク質の共発現と温度認識. 第28回日本分子生物学会年会, 福岡.
- 14) 加藤喜明, 松川和重, 伊藤菊一. 2005. 発熱植物ザゼンソウから得られた新規UCP遺伝子を導入した出芽酵母細胞の機能解析. 第28回日本分子生物学会年会, 福岡.
- 15) 松川和重, 伊藤菊一. 2005. 動物細胞における膜貫通ドメイン5番を欠失した脱共役タンパク質の発現とその機能解析. 第28回日本分子生物学会年会, 福岡.
- 16) 伊藤孝徳, 伊東靖子, 長田洋, 伊藤菊一. 2005. ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムに基づく体温振動リズムの解析. 第28回日本分子生物学会年会, 福岡. (ワークショップ発表採択)
- 17) 伊藤菊一. 2005. ザゼンソウの温度制御システムとその応用. 日本植物学会東北支部第18回岩手大会公開シンポジウム, 盛岡.
- 18) 高橋賢, 遠藤雄大, 千葉茂樹, 伊藤孝徳, 伊藤菊一, 長田洋. 2005. ザゼンソウの温度制御アルゴリズムの工学的応用に関する研究. 電気関係学会東北支部連合大会, 盛岡.
- 19) 高橋賢, 遠藤雄大, 千葉茂樹, 伊藤孝徳, 伊藤菊一, 長田洋. 2005. ザゼンソウ型制御アルゴリズムの温度制御装置への応用に関する研究. 第66回応用物理学会学術講演会, 徳島.
- 20) 伊東靖子, 加藤喜明, 大塚稔, 恩田義彦, 松川和重, 伊藤菊一. 2006. ザゼンソウの熱産生に関与する脱共役蛋白質UCPの生化学的解析. 日本農芸化学会2006年度(平成18年度)大会, 京都.

その他

- 1) 伊藤菊一. 2005. ザゼンソウと自然保護. 北上市藤根ザゼンソウ園里開き記念講演会, 北上.
- 2) 伊藤菊一. 2005. 発熱する植物、ザゼンソウ. 白馬ざぜん草祭り講演, 白馬.
- 3) 伊藤菊一. 2005. ザゼンソウの温度制御システム. 東北大学大学院生命科学科遺伝子システム学講座セミナー, 仙台.
- 4) 伊藤菊一. 2005. ザゼンソウの世界. 一戸町民セミナー, 一戸.
- 5) 伊藤菊一. 2005. 発熱植物メカニズムを解析し温度を制御する技術を産業に応用する研究. 平成17年度東北農業試験研究推進会議生物工学推進部会生物工学研究会シンポジウム, 盛岡.
- 6) 伊藤菊一. 2005. 恒温植物が有する発熱制御特性に基づく先端的産業応用. イノベーション・ジャパン2005, 東京.
- 7) 伊藤菊一. 2005. ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムの先端的産業応用. 岩手大学との連携による

新技術説明会, 東京.

- 8) 伊藤菊一. 2005. ザゼンソウの発熱のメカニズム. 人と社会のための岩手大学 21 世紀 COE プログラムー岩手農林研究協議会 (AFR) シンポジウム特別企画ー, 盛岡.
- 9) 伊藤菊一. 2005. 発熱植物ザゼンソウの不思議ー耳を澄まして聞いてみよう。野生植物からのメッセージを！ー. 平成 17 年度岩手大学ウインターセッション, 盛岡.
- 10) 伊藤菊一. 2006. ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムの先端的産業応用. 研究成果プレゼンセミナー, 北上.
- 11) 伊藤菊一. 2006. ザゼンソウ発熱現象に基づく先端的産業応用研究. 第 5 回イーハートーブ研究会, 盛岡.
- 12) 伊藤菊一. 2006. 発熱植物ザゼンソウの不思議. 一関一高出前講義, 一関.
- 13) 伊藤菊一. 2006. 社会と人のためのザゼンソウ研究. 北上市藤根ザゼンソウ園里開き記念講演会, 北上.

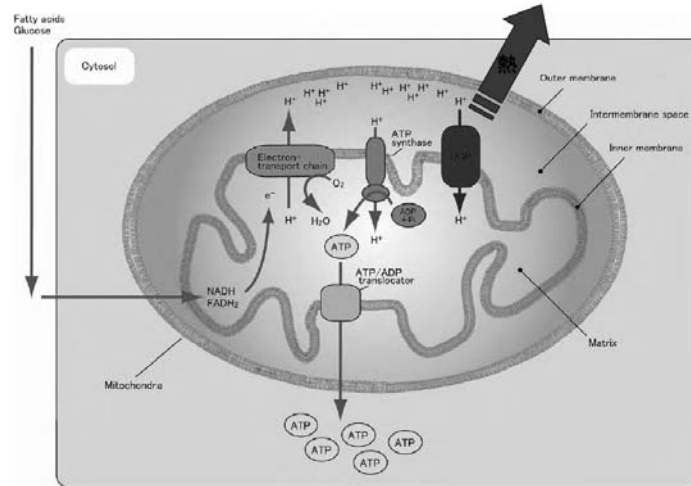


図1 ミトコンドリアにおける脱共役タンパク質 (UCP) の熱産生における機能

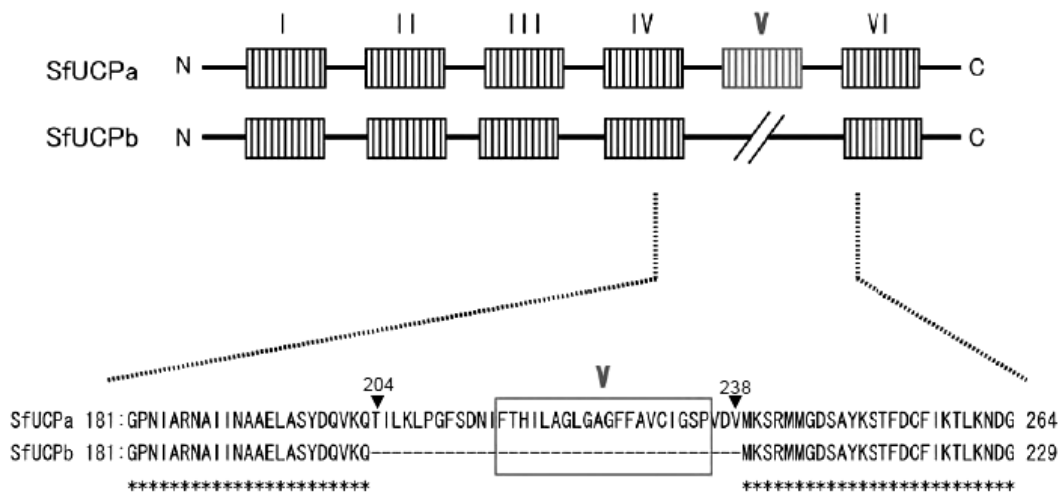


図2 ザゼンソウにおける2種類のUCP因子の構造

I～VIは疎水性アミノ酸に富む膜貫通ドメインを示す

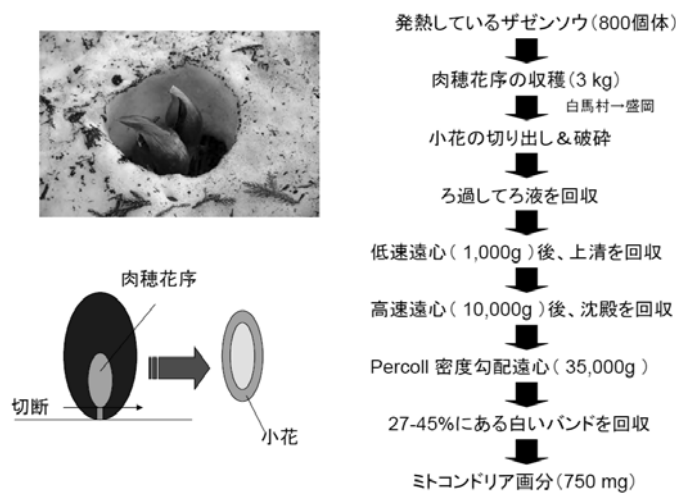


図3 ミトコンドリア調製の概要

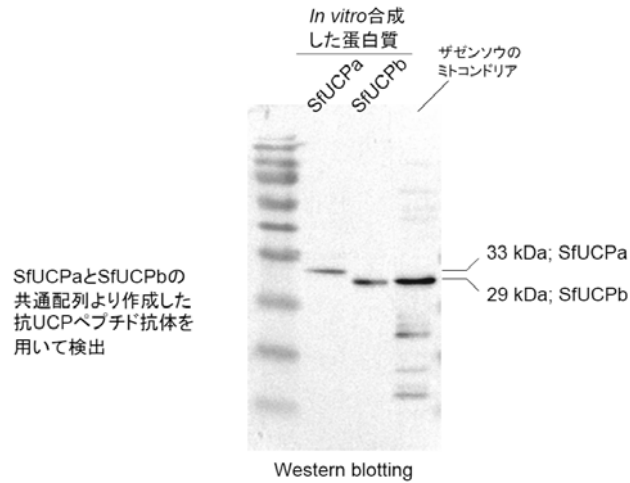


図4 ザゼンソウ肉穂花序におけるUCPタンパク質の発現

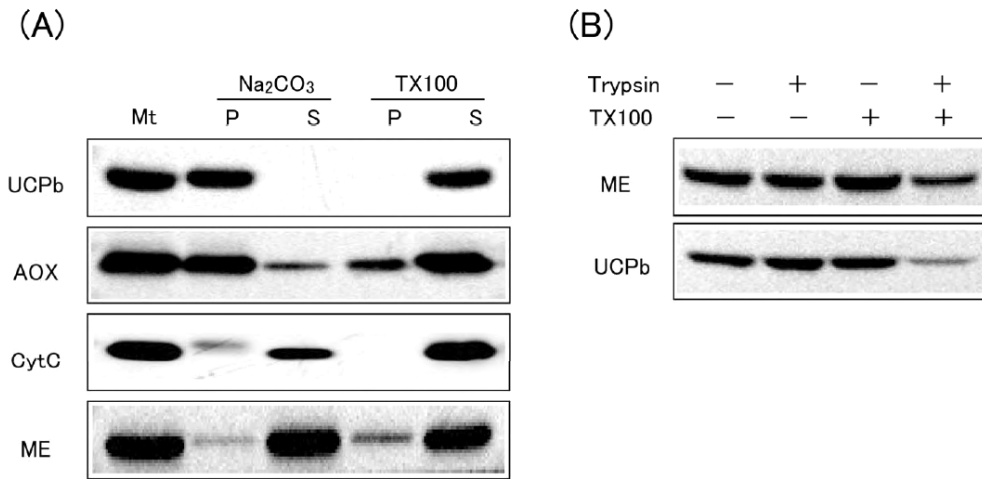


図5 ザゼンソウミトコンドリアにおけるSfUCPb局在部位に関する生化学的解析

(A) ミトコンドリアをNa₂CO₃あるいはTriton X-100 (TX100)により処理し、遠心後、沈殿(P)と上澄(S)に分画し、SfUCPb (UCPb), Alternative oxidase (AOX), Cytochrome C (CytC), および, Malic Enzyme (ME) に対する特異抗体により検出した。(B) ミトコンドリアに対し、Trypsin および/あるいは Triton X-100 を処理し、SfUCPb およびME についてそれぞれの特異抗体により検出した。

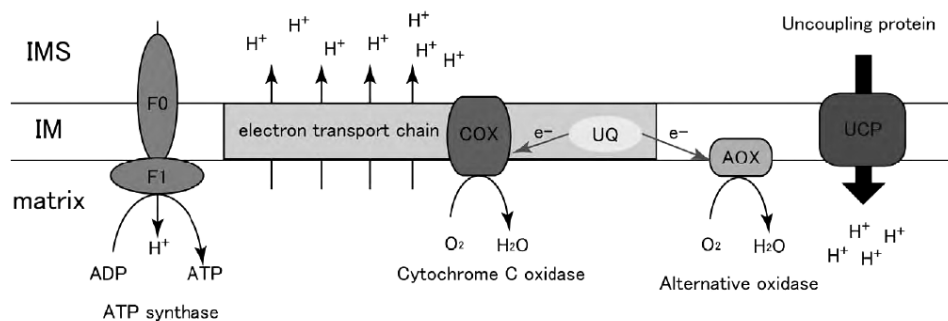


図6 ザゼンソウ肉穂花序ミトコンドリアにおけるUCPの機能

5回膜貫通型 SfUCPb (UCP) は電子伝達鎖により生じたプロトン濃度勾配を解消し、発熱反応を誘導する。また、ザゼンソウミトコンドリアには、Cytochrome C oxidase (COX) と呼吸酵素シアン耐性呼吸酵素 (AOX) の2種類の呼吸酵素が存在し、ユビキノン (UQ) 由来の電子を基に酸素を水に還元する。

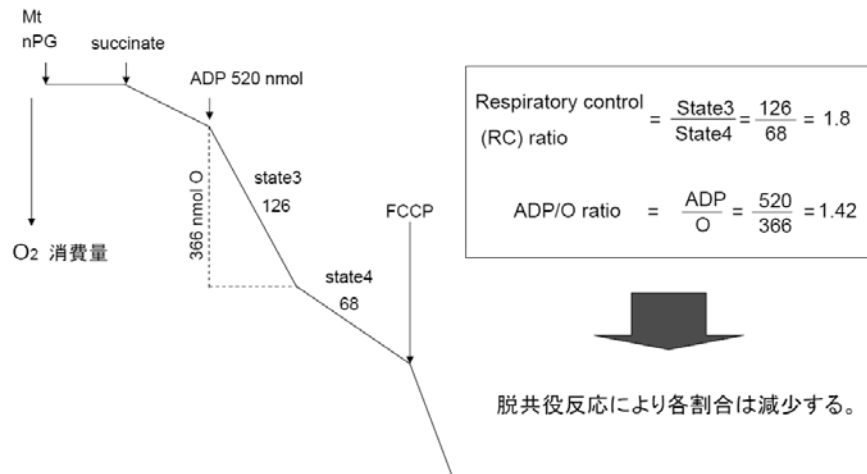


図7 ザゼンソウ肉穂花序ミトコンドリアを用いた脱共役活性の評価方法

ミトコンドリア (Mt) に対し、コハク酸を基質とする呼吸を誘導させ、ADP 添加による呼吸状態 (state3 および state4) を測定する。活性測定においては、AOX の特異的阻害剤である *n*-propyl gallate (nPG) を添加した。また、state4 の呼吸を測定した後で、合成アンカップラーである *p*-(trifluoromethoxy) phenylhydrazone (FCCP) を添加し、膜電位を人為的に低下させた際の酸素消費量も解析した。

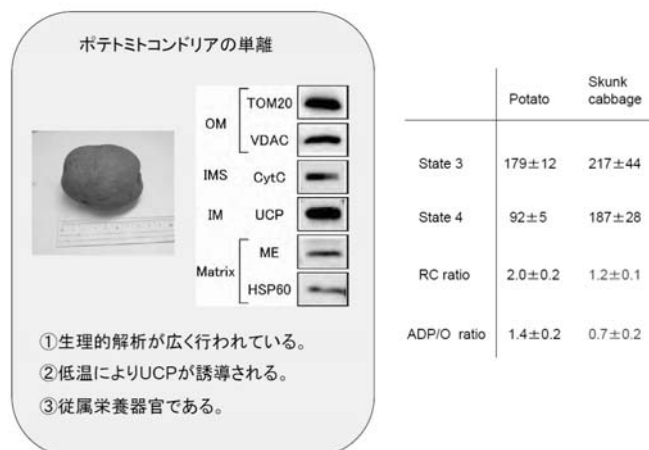


図8 ザゼンソウ肉穂花序ミトコンドリアにおける呼吸特性は高い脱共役活性を示す

ポテトミトコンドリアの外膜 (OM), 膜間スペース (IMS), 内膜 (IM), および、マトリックスマーカータンパク質の発現 (左)。ポテト塊茎 (Potato) およびザゼンソウ肉穂花序 (Skunk cabbage) ミトコンドリアにおける呼吸特性。ポテト塊茎ミトコンドリアに比べ、RC ratio および ADP/O ratio が低下している (右)。

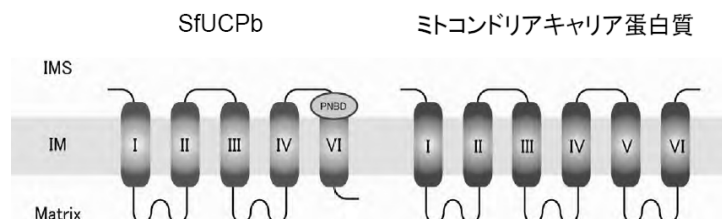


図9 ザゼンソウ肉穂花序で主に発現している SfUCPb とミトコンドリアキャリアタンパク質の予想される膜トポロジー