

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360168

研究課題名(和文) ザゼンソウにおける発熱制御システムおよびエネルギーフローに関する研究

研究課題名(英文) Heat control system and energy flow in the skunk cabbage

研究代表者

長田 洋 (OSADA, Hiroshi)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：10261463

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円、(間接経費) 4,290,000円

研究成果の概要(和文)：氷点下を含む外気温の変動にも関わらず、その肉穂花序の温度を約20 程度に維持できる恒温性を有する植物であるザゼンソウの温度制御機構に存在する省エネルギー特性を提供するメカニズムの一つとして、その地下器官(特に茎部)の役割に関して多くの知見を得ることができた。生体を用いた実験とシミュレーションから、ザゼンソウの茎は、花序から球茎方向への熱を伝え難く、球茎から花序方向へ熱を伝えやすいと推測できる。ザゼンソウの茎の長さはおおむね20 cm程度であり、その熱伝導は地中の安定な熱を伝えやすい方向となっていることから、ザゼンソウの茎は花序の温度安定度に大きく貢献しているものと思われる。

研究成果の概要(英文)：The temperature of the spadix of the skunk cabbage is maintained at around 20 degrees Celsius in spite of a change of the temperature including below the freezing point. The temperature control structure of this skunk cabbage possesses an energy-saving characteristic. As one of the mechanism to provide the energy-saving characteristic, we got a lot of knowledge about the function of the underground organ (particularly a stalk part) of the skunk cabbage. From the experiment using the living body of the skunk cabbage and the simulation, the stalk of the skunk cabbage is hard to convey the heat from a spadix to a corm and is easy to introduce heat from a corm into the spadix. Because the length of the stalk of the skunk cabbage is around 20 cm, and it can supply stable heat of the underground to a spadix, it seems that the stalk does large contribution in the temperature stability of the spadix.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：植物 発熱 制御 エネルギー

1. 研究開始当初の背景

岩手県等の寒冷地に自生するザゼンソウと呼ばれる植物 (*Symplocarpus foetidus*) は、氷点下を含む外気温の変動にも関わらず、その肉穂花序と呼ばれる数 cm の球状部分の温度を約 20 程度に維持できる恒温性を有する植物である。

発熱制御するためには、少なくとも温度センサーとヒーターに相当する機構が必須であるが、動物のように神経系を有していないザゼンソウには、動物とは異なる独自の発熱制御の仕組みが存在している可能性があり、基礎科学的な興味が存在する。

科学研究費や 21 世紀 COE 等からの助成金を用いたこれまでの研究により、その一部が解明されており、例えば、ザゼンソウの肉穂花序温度の時系列データを決定論的非線形予測法などにより解析することで、ザゼンソウには 2.63 次元という低次元のカオス性が内在することを明らかにし、さらに、ザゼンソウにおける埋め込み次元解析から、本植物の温度制御は 2 次元非線形モデルにより再構築できることが判明している。

現在、ザゼンソウ型の制御アルゴリズムの実用化を検討しているが、その研究過程で、同アルゴリズムは、最も広く利用されている制御アルゴリズムである PID 制御アルゴリズムに比べて、大きな省エネルギー効果を示すことが実験的に確認された。しかし、その仕組みはまだ十分に解明されていない。

2. 研究の目的

恒温植物ザゼンソウは、前年の夏に蓄えた限られたエネルギー源を用いて、早春の厳しい寒さの中で生殖器官の温度を一定に保ち子孫を残している。本研究は、このような限られたリソースにより効率的な制御を行うザゼンソウの温度制御機構を、工学および生化学の両面から解析し、その省エネルギー特性を提供する原理 (メカニズム) を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

ザゼンソウの物理モデルを構成するため、本研究では、これまで調査されていなかったザゼンソウの地下器官を含む各部の熱応答特性に関して、自然環境下と人工環境下で網

羅的に実験を行った。

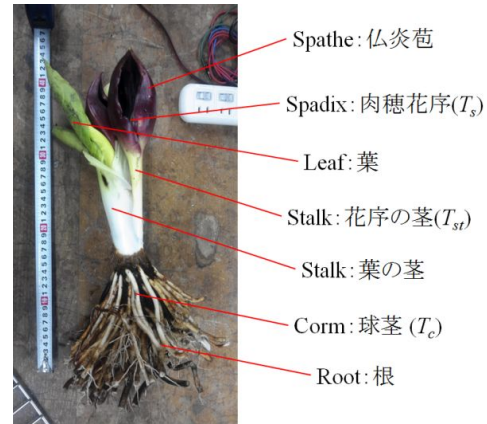


図1 ザゼンソウの各器官と名称

図1はザゼンソウの各器官を示す。仏炎苞、肉穂花序、葉以外は地下にある器官である。なお、試験用個体は、岩手県金ケ崎町等の群生地より採取した。

人工環境下における熱応答特性は、ザゼンソウから土を取り払い、アクリル製の水槽 (縦 30 cm × 横 30 cm × 高さ 30 cm) に入れて恒温槽内に設置し、外気温と水温を調整することにより行った。なお、水温の調節を行うために、図2に示す専用の熱交換装置を作製した。

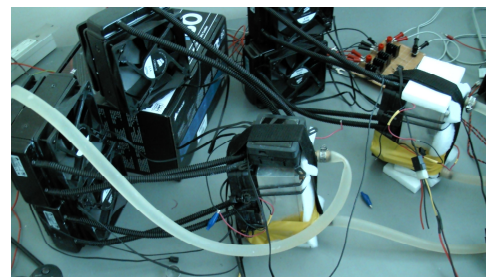


図2 作製した専用熱交換装置

同装置は、ペルチェ素子と専用熱交換器、放熱用ヒートシンクおよびクーラー、ポンプ、制御用回路から構成される。

ザゼンソウの各器官の温度、肉穂花序温度 T_s 、肉穂花序近傍 (地表から 3 cm 程度地下位置) の茎温度 T_{st} 、球茎温度 T_c 、および水温 T_w と気温 T_a は温度記録装置 (RTW-30S, ESPEC MIC CORP.) を用いて 1 分間隔で計測した。

実験から得られたデータを用いて物理モデルを考察し、数学的、生化学的にもモデルの妥当性を推定した。

4. 研究成果

(1) 自然環境下における計測

約1週間程度の期間に対するザゼンソウと地下の温度推移例を図3に示す。

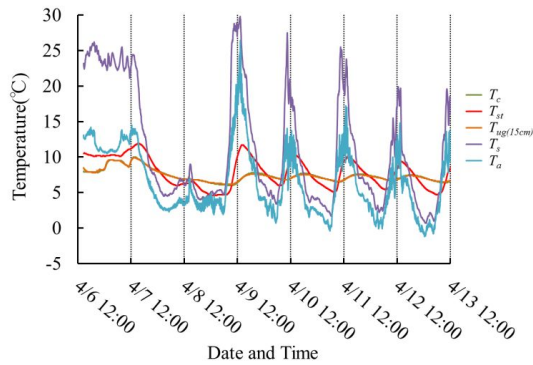


図3 自然環境下における各部の温度推移

同図より、茎 T_{st} の温度は外気温に対して大きくても ± 5 程度の変化となっている。そのため、日中に肉穂花序温度 T_{fl} が上がりすぎた場合（例えば 4/9 12:00）、肉穂花序の体温が茎を通して放熱することで体温の上昇が抑えられている。一方、夜間は地中の温度を茎から肉穂花序へ伝えることで体温の過剰な低下を抑えていることがうかがえる。

(2) 人口環境下における計測および解析

熱伝導率計測装置（KD2 Peo, DECAGON DEVICES Inc.）により測定した、ザゼンソウの各器官の熱伝導率を表1に示す（平均値 \pm 標準偏差）。同表より、ザゼンソウの熱伝導率は、球茎が最も高い値（0.416 W/mK）を示した。これは、根部が存在する地下では地上部に比べて温度変化が少ないため、高い断熱機能を必要としないためと思われる。一方、仏炎苞は最も低い熱伝導率（0.181 W/mK）を示した。仏炎苞は肉穂花序を覆う器官であるが、氷点下を含めて最大で 30 以上の温度変化を示す温度環境や雪から肉穂花序を守る働きをするためと思われる。

表1 各器官の熱伝導率

器官	熱伝導率[W/mK]
根	0.323+0.011
肉穂花序	0.313+0.013
茎（肉穂花序）	0.311+0.008
茎（葉）	0.256+0.017
球茎	0.416+0.004
仏炎苞	0.181+0.004

図4は、肉穂花序の発熱が明らかとなるとき球茎（水温）、および外気温に対する肉穂花序の温度応答を示す。同図より、外気温が低下すると（600 min 付近）、肉穂花序は一旦低下した後それを回復しようとフィードバック制御が掛かるという、これまでに得られていた知見が見て取れる。一方、球茎の温度を下げても肉穂花序の温度はわずか（1 程度）しか変わらなかった（100~600 min）。

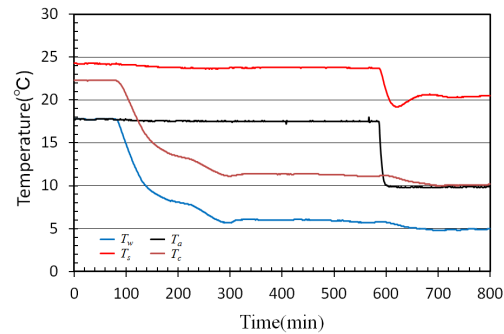


図4 球茎（水温）および外気温の温度変化に対する発熱期の肉穂花序温度応答特性

図5は、水温変化による発熱期を過ぎたザゼンソウの各器官の温度変化の結果を示す。外気温は 5 に設定し、 $t = 40$ min から最大で 10 分間で 1 程度の温度変化量で水温を下げ、約 300 min 間で 10 下げた。その結果、肉穂花序および茎の温度は、それぞれ約 1.5 および 1.1 低下した。水温の低下によって球茎が冷やされ、さらに肉穂花序の茎や肉穂花序の温度が下がることがわかる。しかし、発熱期と同様、球茎の温度変化は肉穂花序や茎までは伝わり難い。

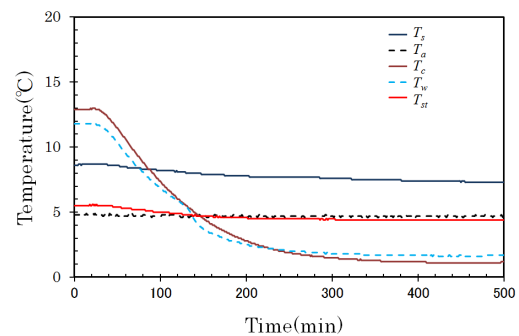


図5 球茎（水温）の温度変化に対する発熱期を過ぎた肉穂花序と茎の温度応答特性

図6は、発熱期において、茎の温度を一時的に下げた場合の各器官の応答特性を示す。 $t = 20$ min で、水槽の水を茎全体が浸かるまで給水した。その結果、茎の温度が急激に 6

程度下降し、その後ゆっくりと回復していった。一方、肉穂花序の温度は茎の温度が低下してから 20 min ほどで 3 程度下降し、その後 50 min ほどかけて温度制御後に安定した。このことは、茎は肉穂花序の温度変化に与える影響は球茎より大きく、肉穂花序の体温制御を発動するほどであることを示している。

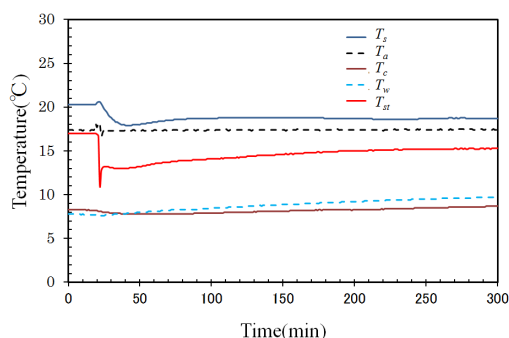


図6 茎の温度変化に対する発熱期の各器官の温度応答特性

図7は、恒温槽内の気温をステップ状に変化させたときのザゼンソウ各器官の温度変化を示す。ザゼンソウの各器官は、外気温の変化に伴ってそれぞれの時定数で変化していることがわかる。

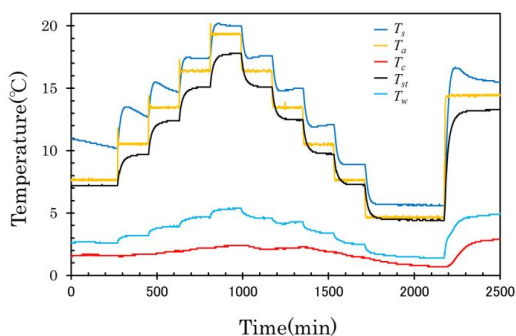


図7 外気温変化に対するザゼンソウ各器官の温度変化

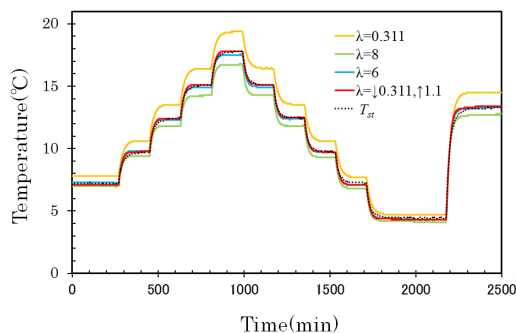


図8 茎部の実験値(点線)と計算値(実線)の比較

図8は、図7の測定結果における茎部の温度変化に対するいくつかのシミュレーション結果(熱回路網法)を示す。

同図より、シミュレーションに生体の茎の熱伝導率データ($\lambda = 0.311 \text{ W/mK}$)を用いると、実験値と大きく異なる結果となることがわかる。一方、 $\lambda = 6 \text{ W/mK}$ とすると実験値を再現できるものの、実測値とは大きく異なる値となる。そこで、熱伝導率に方向性を持たせ、上方向への熱伝導率 $\lambda = 1.2 \text{ W/mK}$ 、下方向への熱伝導率 $\lambda = 0.311 \text{ W/mK}$ として計算したところ、実験値に近い値を示した。生体を計測して求めた熱伝導率と熱応答実験とシミュレーションから求めた熱伝導率との違いは、生体の熱伝導率の計測の際に、植物の持つ生体機能の欠損によるものと考えられる。

以上の実験およびシミュレーションから、ザゼンソウの茎は、肉穂花序から球茎方向への熱を伝え難く(球茎の温度が低下しても肉穂花序への影響は少ない)、球茎から肉穂花序方向へ熱を伝えやすいと推測できる。

図9は、群生地における地中の温度分布及び温度変化の様子を示す。群生地の地下約40 cmの温度は7で安定しており、外気温による24時間の温度周期はほとんど観測されない。一方、地下約20 cmでは外気温の影響を受け2程度の振幅で変化するが、その位相は外気温と4~5時間程度の差がある。

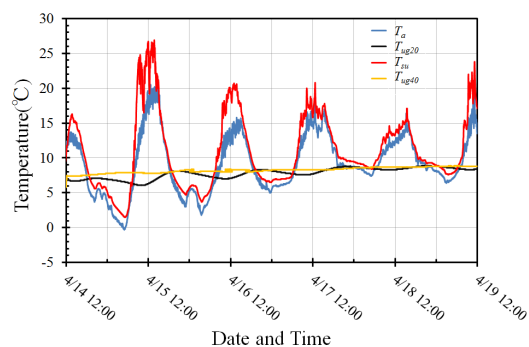


図9 ザゼンソウ群生地の地中の温度分布および温度変化特性

ザゼンソウの茎の長さはおおむね20 cm程度であり、その熱伝導は地中の熱を伝えやすい方向となっていることから、ザゼンソウの茎は肉穂花序の温度安定度に大きく貢献しているものと思われる。

本研究では、ザゼンソウの温度制御機構に内在する省エネルギー特性を提供するメカ

ニズムの一つとして、茎部の役割に関して多くの知見を得ることができた。現在、得られた知見をまとめて論文誌に投稿すべく準備中である。

なお、本研究では、ザゼンソウの茎の熱伝導率は方向性を有するという結論に至ったが、これについてはより詳細な検証を要する。すなわち、物質としての熱伝導率（あくまでシミュレーション上の）は分かったが、生体として熱伝導率を変える原因は何かを理解する必要がある（例えば、体内の水の循環速度による見掛けの熱伝導率など）。生物は水や養分を絶えず循環させながら活動しているため、水が体温に与える影響を調査すればより詳しく熱解析ができると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4 件)

佐々木友紘, 高原良幸, 工藤俊祐, 伊藤孝徳, 石橋政三, 伊藤菊一, 千葉茂樹, 長田洋, ザゼンソウの熱生成および制御システム, 計測自動制御学会東北支部第 287 回研究集会, 2014.3.17, 東北工業大学(宮城県)

高原良幸, 工藤俊祐, 千葉茂樹, 伊藤孝徳, 伊藤菊一, 長田洋, ザゼンソウの各器官が発熱制御へ及ぼす影響に関する研究, 平成 25 年度応用物理学会東北支部学術講演会, 2013.12.5, 山形大学(山形県)

照井翔太, 伊藤孝徳, 伊藤菊一, 石橋政三, 仲摩 崇, 千葉茂樹, 長田洋, ザゼンソウの制御モデルに関する研究, 応用物理学会東北支部第 66 回学術講演会 2011.12.1, いわて県民情報交流センター(岩手県)

伊藤孝徳, 佐藤大輔, 照井翔太, 飯田悠人, 千葉茂樹, 石橋政三, 仲摩 崇, 伊藤菊一, 長田洋, 恒温植物ザゼンソウの体温制御に由来する温度制御アルゴリズムに関する研究, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011.3.26, 神奈川工科大学(神奈川県)

6. 研究組織

(1)研究代表者

長田 洋 (OSADA, Hiroshi)
岩手大学・工学部・教授
研究者番号: 10261463

(2)研究分担者

伊藤 菊一 (ITO, Kikukatsu)
岩手大学・農学部・教授
研究者番号: 50232434