

恒温植物ザゼンソウの体温維持機構に関する制御工学的解析

Analysis of the Mechanism to Maintain Body Temperature of “Zazenso” Plant (*Symplocarpus foetidus*) from the View Point of Control Engineering

○原 道宏, 鳥巢 諒, 伊藤 菊一

○Michihiro Hara, Ryo Torisu, Kikukatsu Ito

岩手大学

Iwate University

キーワード: 発熱植物 (thermogenic plants), ザゼンソウ (*Symplocarpus foetidus*), 体温維持 (maintaining the body temperature), 制御工学 (control engineering), 解析 (analysis)

連絡先: 〒020-8550 盛岡市上田 3-18-8 岩手大学 農学部 農林環境科学科 リサイクル生物生産工学講座
環境制御工学研究室 原 道宏, TEL&FAX: (019)621-6125, E-mail: mrhara@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

一般に、植物の体温は外気温の変化とともに変動するものと考えられているが、驚くべきことに、ある種の植物には、自ら発熱し、その体温を積極的に調節できるものが存在する。例えば、我が国の寒冷地に自生し、早春に花を咲かせるザゼンソウ (*Symplocarpus foetidus*) は氷点下を含む外気温の変動にも関わらず、肉穂花序と呼ばれる特異器官の温度を 20°C 内外に維持できる発熱植物である。これまで国内外で報告されている発熱植物の中で、寒冷環境下で積極的に発熱し、かつ、その体温を自立的に調節できる恒温性を有する植物は、ザゼンソウ以外には例がない。本植物の発熱現象には、生物進化の過程で獲得した温度制御システムに関する巧妙な仕掛け・仕組みが含まれていると考えられ、その制御メカニズムの解析は生物学のみならず制御工学の観点からも非常に興味深い内容を含んでいる。

本論文の目的は、ザゼンソウが内蔵する体温制御機構を制御工学的に解析することである。

2. 材料および方法

測定したザゼンソウの肉穂花序の諸元 重量：
 $W=2.7468\text{g}$, サイズ: 赤道の直径 1.37cm , 1.29cm , 上下両極間の直径 2.60cm , 体積: $V=2.406\text{cm}^3$, 表面積: $S=9.314\text{cm}^2$, 比重量: $\gamma \equiv W/V=1.142\text{g/cm}^3$, 代表長さ: $D_e \equiv 6V/S=1.550\text{cm}$

測定日と場所 発熱期: 2006/05/09~10 (長野県白馬村のザゼンソウ自生地), 無発熱時: 2006/05/12 (インキュベータ=温度調節庫)

測温センサ サーミスタ温度計 ($\text{dev}=0.1^{\circ}\text{C}$)

方法 発熱期にあるザゼンソウの周囲を雪で囲い、個体周囲の温度をステップ状に低下させ、肉穂花序の温度 (以下、体温と呼ぶ) の変化 (応答) を測定した。この測定を終えた後、当該肉穂花序を切除してインキュベータ内で約 20°C の恒温で保管し、発熱が無くなるのを待って、インキュベータ気温をステップ状に低下させ、同様に、体温の変化を測定した。

3. 結果と解析

3. 1 無発熱状態でのステップ応答について

無発熱状態において気温をステップ状に低下させた時の体温変化を気温変化とともに図1に示す。

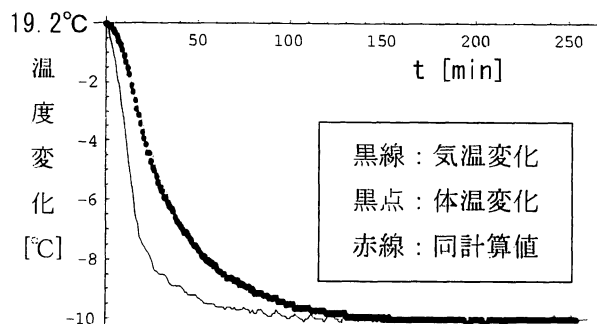


図1 無発熱状態におけるステップ応答

気温と体温の折れ線近似をラプラス変換し気温 $X[s]$ から体温 $Y[s]$ への伝達関数 $G2[s] \equiv Y[s]/X[s]$ をパデ近似したところ、

$$G2[s] = (1 + 3.628s) / (1 + 21.58s) \quad [1]$$

と得られた。この $G2[s]$ と $X[s]$ とから $Y[s] = G2[s]X[s]$ により計算された体温を図1に赤線で示した。この体温計算値の測定値に対する二乗平均平方根誤差(以下、平均誤差と呼ぶ)は 0.097°C であった。よって、このパデ近似を適切と判断した。

3.2 発熱期のステップ応答について

発熱しているザゼンソウに金網、ビニールフィルム、雪をかぶせ個体周囲の温度低下させたときの体温変化を気温変化とともに図2に示す。

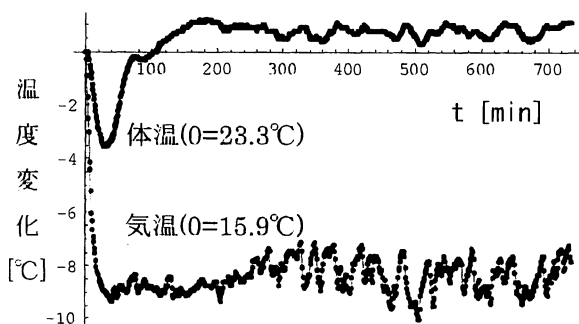


図2 発熱期におけるステップ応答

3.3 発熱温位を求める

肉穂花序の発熱部は外皮直下である。したがって、個体からの発熱は周囲から届いた熱と合算されて体温形成に関わる。そこで、肉穂花序からの発熱をそれと同等の効果をもたらす気温(これを、発熱温位 $u[t]$ 、また、そのラプラス変換を $U[s]$ と呼ぶ)と定義すれば、次式が成り立つ。

$$Y[s] = G2[s](X[s] + U[s]) \quad [2]$$

したがって、 $U[s]$ は次のように求められる。

$$U[s] = Y[s]/G2[s] - X[s] \quad [3]$$

発熱期に測定された体温 $Y[s]$ 、気温 $X[s]$ および前述のように求められた式[1]の伝達関数 $G2[s]$ から式[3]により求められた $U[s]$ を逆ラプラス変換して求められた発熱温位 $u[t]$ を図3に示す。

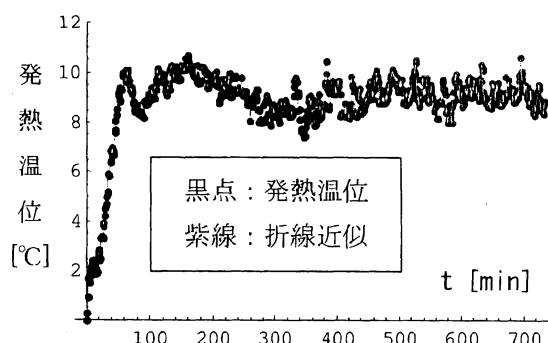


図3 ステップ応答で見られた発熱温位

3.4 体温制御系に関する解析

ザゼンソウの体温制御系が制御工学的に言ってどのようなになっているのかは不明である。

本論文では、ザゼンソウの体温制御系を、図12のような単純なフィードバック制御系と仮定して解析してみることにした。したがって、注意すべきは、本論文は「ザゼンソウがこのような単純なフィードバック制御系を持っている」と主張するものではなく、「もしザゼンソウが図12のようなフィードバック制御系を持っているとするならば、それはこのようなものであろう」と主張しているに過ぎないことである。

さて、制御装置 $G0[s]$ と目標値 $r[t]$ (このラプラス変換 $R[s]$) からなる単純なフィードバック制御系は

発熱温位をつぎのように生成する。

$$U[s]=G0[s](R[s]-Y[s]) \quad [4]$$

ここで注意すべきことは、式[4]には未知数（実は、未知関数）が2つあることである。それは、 $G0[s]$ と $R[s]$ である。

もちろん、たとえば、 $R[s]$ が分れば、式[4]を変形し、式[5]により $G0[s]$ が計算される。

$$G0[s]=U[s]/(R[s]-Y[s]) \quad [5]$$

しかし、式[5]により $G0[s]$ を計算するには式[5]の右辺を簡単にする必要がある。すなわち $y[t]$ を折れ線近似した $Y[s]$ のままだは式[5]が計算できない。そこで、 $Y[s]$ を多項式近似した。具体的には、 $y[t]$ を次のようにした。

$$\begin{aligned} y[t] = & 1.86434 - 0.260691 e^{-0.0229965 t} - \\ & 5.59223 e^{-0.0126373 t} - 0.022729 e^{-0.0229965 t} t + \\ & 3.98858 e^{-0.0312972 t} \text{Cos}[0.0869768 t] + \\ & 0.754347 e^{-0.0312972 t} \text{Sin}[0.0869768 t] \end{aligned} \quad [6]$$

$r[t]$ を式[7a]のように一定と仮定する。

$$r[t]=\text{Limit}[y[t], t \rightarrow \infty]=1.8643 \text{ (一定)} \quad [7a]$$

$$R[s]=1.8643/s \quad [7b]$$

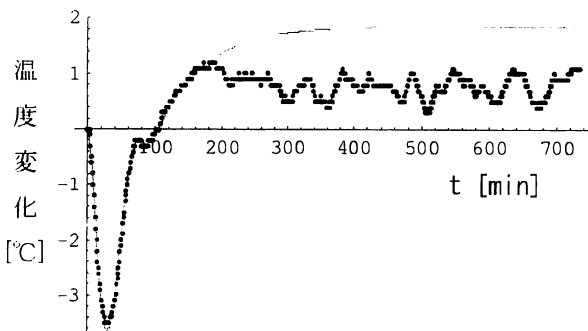


図4 ステップ応答体温の近似

同様に、気温 $X[s]$ を多項式近似した。

$$\begin{aligned} x[t] = & -8.79424 - 2.00759 e^{-0.664394 t} + 9.97855 e^{-0.231931 t} + \\ & 1.09753 e^{-0.231931 t} t + e^{-0.0238413 t} \\ & (0.746061 \text{Cos}[0.228686 + 0.0821271 t] + \\ & 0.426299 \text{Sin}[0.228686 + 0.0821271 t]) \end{aligned} \quad [8]$$

この近似を図5に実線で示す。すると、 $U[s]$ は式[3]で示され、発熱温位 $u[t]$ が求められる。この $U[s]$ のうち、 $Y[s]/G2[s]$ を逆体温と呼ぶことにする。

これらをまとめて図6に、またその $t \leq 256 \text{ min}$ までの拡大図を図7に示す。図7に示されるように、式[6]、[8]の近似および式[1]のパデ近似は $t \leq 256 \text{ min}$ までの気温、体温および発熱温位を精度良く表しているといえる。

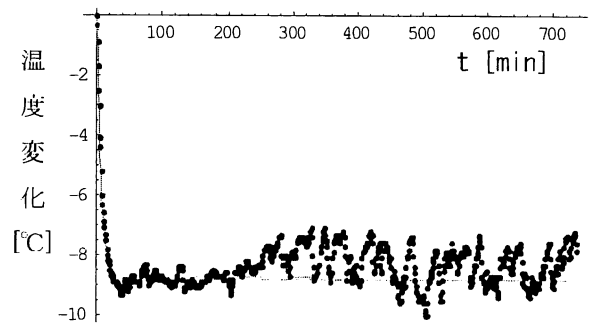


図5 ステップ応答気温の近似

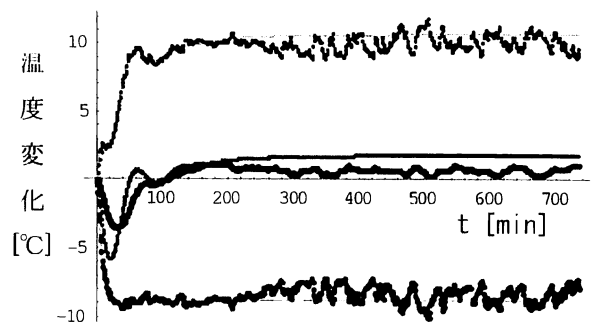


図6 ステップ応答の近似

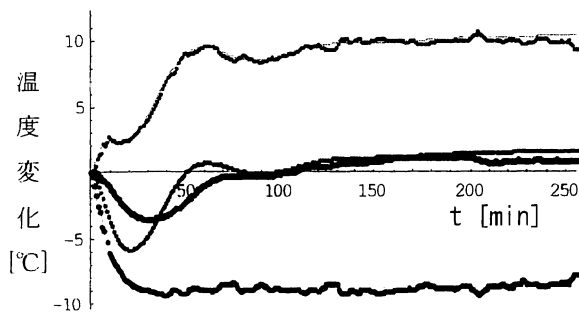


図7 ステップ応答の拡大図

このとき、ザゼンソウの温度制御目標値 $r[t]$ を式[7a]のように $t \rightarrow \infty$ における $y[t]$ の極限值（一定値）と仮定すれば、ザゼンソウの温度制御装置の伝達関数 $G0[s]$ は式[9]のようになる。このインディシャル応答は図8に示される。

$$G0[s] = \frac{0.0224607}{s} + \frac{0.00104142}{0.0181638 + s} - \frac{0.00599085}{0.0311356 + s} - \frac{3.19189 \times 10^{-14}}{0.0463436 + s} + \frac{0.101012}{(0.231931 + s)^2} + \frac{0.251165}{0.231931 + s} + \frac{0.269079}{0.275636 + s} - \frac{0.690205}{0.664394 + s} + \frac{0.000248699 + 0.00208525s}{0.00731327 + 0.0476827s + s^2} - \frac{-0.0512298 + 0.0704304s}{0.025701 + 0.0747595s + s^2}$$

[9]

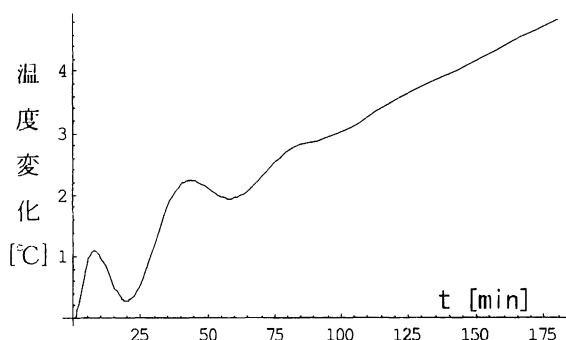


図8 制御装置（式[9]）のインディシャル応答

この制御装置式[9]は複雑に過ぎるように感じられるので、その低次部を制御装置の主要部と見る見方もあろう。主要部は例えば式[10]の $G01[s]$ である。そして、 $G01[s]$ のインディシャル応答は図9に示される。

$$G01[s] = \frac{0.0688496 (0.0204565 + s)}{(0.0839618 + s) (0.74581 + s)} \quad [10]$$

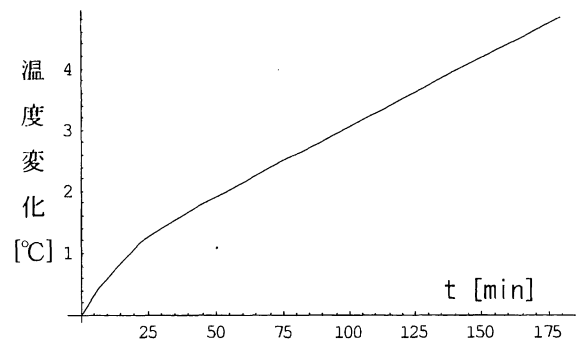


図9 制御装置 $G01[s]$ のインディシャル応答

さて、そうすると、簡略化された $G01[s]$ は真の制御装置 $G0[s]$ とは異なる。それをインディシャル応答の差としてみれば図10のようになる。図10に示されるように、この両インディシャル応答の差は衰振動的であり、振動の周期は35~45minである。

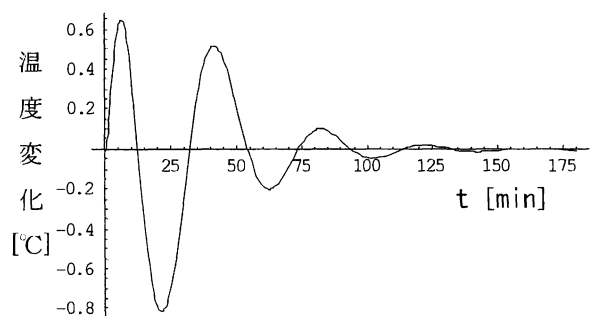


図10 $G0[s]-G01[s]$ のインディシャル応答

ひるがえって、制御装置が式[10]の $G01[s]$ であるとすれば、目標値は式[11]の $R1[s]$ になる。

$$R1[s] = (Y[s]/G2[s] - X[s])/G01[s] + Y[s] \quad [11]$$

式[11]により求められる $R1[s]$ を逆ラプラス変換して得られる目標値の時間関数 $r1[t]$ は図11のようになる。図11で示される目標値も減衰振動のように見えるが、こちらの振動の周期は58~70minであり、図10に見られた制御装置の振動の周期35~45minの約

1.6 倍である。

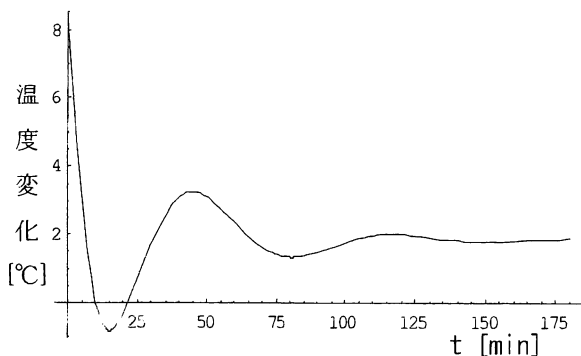


図 11 制御装置が G01[s]であるときの目標値

4. まとめ

4.1 発熱植物ザゼンソウを長野県白馬村の自生地の現場で温度測定した。ザゼンソウの 1 個体を雪囲いして温度を 10℃ほど下げるステップ状の環境温度変化を与え、発熱部位であるザゼンソウの肉穂花序の温度変化を測定した。

4.2 自生地におけるこのステップ応答試験の後、当該肉穂花序を柄の途中で切断して研究室に持ち帰り、インキュベータで約 20℃の恒温に保ち、発熱が止むのを待って周囲温度を 10℃ほど下げるステップ状の環境温度変化を与え、同様にザゼンソウの肉穂花序の温度変化を測定した。

4.3 インキュベータにおけるステップ応答試験から気温から肉穂花序の温度（体温）に至る伝達関数 $G2[s]$ が、パデ近似として、簡潔な形で求められた。

自生地における体温測定値に伝達関数 $G2[s]$ を逆に作用させることにより逆体温が求まり、気温との差として発熱温位が求められた。

4.4 体温と気温のラプラス変換を有理関数で近似し、逆計算を容易にした。

4.5 ザゼンソウが持つ温度制御機構を求めるべく体温をフィードバックし目標値との差をとり制御装置に導く単純な制御機構（図 12）を想定した。ここにおける問題は未知関数が「目標値」と「制御装置」と 2 個存在することである。これらの満たすべき方程式は 1 個しかなく、互いに他に従属して定まるという関係にあり、一意には定まらないことである。

4.6 そこで、まず目標値 $r[t]$ を一定と仮定して制御装置 $G0[s]$ を求めた。すると $G0[s]$ のインディシ

ヤル応答は周期 35～45min の減衰振動を付帯することが分った。

4.7 つぎに、制御装置 $G0[s]$ から振動成分を除いたものを新たな制御装置 $G01[s]$ と設定し、このとき有るべき目標値 $r1[t]$ を求めたところ、今度は周期 58～78min のやはり減衰振動であることが分った。

5. おわりに

このように、制御装置と目標値は対（つい）として存在するのであり、対が正当である限り、どのような組み合わせであっても同じ応答を示すのであり、ステップ応答試験からは制御装置と目標値を特定することはできない。そこで、ザゼンソウ内の生化学的な物質の濃度やエネルギーレベルの時間変化から周期を指標にして目標値や制御装置を同定できるのではないかと期待される。

なお、関数の簡易化においては、結局、 $t \leq 256\text{min}$ の現象のみを扱った。 $t > 256\text{min}$ においては、気温は大きく急変しないものの、平均値の回りで変動していた。したがって、 $t > 256\text{min}$ におけるデータ解析から、また、新たな結果が得られるかもしれない。これは今後の課題とする。

参考文献

- 1) 伊藤菊一：植物の発熱現象と植物ホルモン、植物の生長調節、39(2)、167-173 (2004)
- 2) 石井威望：発熱遺伝子を持つ植物・ザゼンソウ、石井威望の世界新技術レポート Techno Current、No.404、1-13 (2005)
- 3) 伊藤孝徳、伊東靖子、伊藤菊一：ザゼンソウの発熱制御システム、化学と生物、44(4)、225-232 (2006)

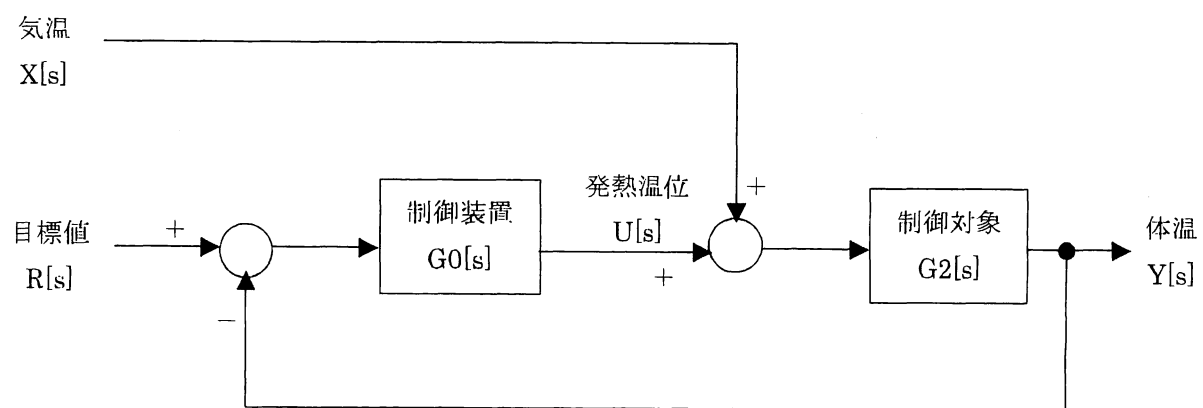


図 12 想定した温度制御機構