

## ザゼンソウの熱生成および制御システム

### Heat generation and control system of the skunk cabbage

- 佐々木友紘\*, 高原良幸\*, 工藤俊祐\*, 伊藤孝徳\*  
石橋政三\*\*, 千葉茂樹\*, 長田 洋\*
- Yuko Sasaki\*, Yoshiyuki Takahara\*, Shunsuke Kudo\*, Takanori Itou\*,  
Shozo Ishibashi\*\*, Shigeki Chiba\*, Hiroshi Osada\*

\*岩手大学, \*\*株式会社チノー  
\*Iwate University, \*\*Chino Corp.

キーワード: 温度制御(temperature control), 省エネルギー(saving energy),  
ロバスト性(robustness), 恒温植物(homeotherm plant)

〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部電気電子・情報システム工学科長田 洋  
TEL/FAX 019-621-6381

#### 1 序論

2011 年 3 月以降, 日本の電力供給量が低下している. そのため, 各企業, 各家庭において省エネルギー化を進めることが重要視されている. 本研究では, ザゼンソウアルゴリズムを用いた省エネルギーシステムについて検討した.

#### 2 概要

これまで植物は体温制御システムを持たず, 周囲温度の変化とともに変動するものと考えられてきた. 岩手県などの寒冷地に自生するサトイモ科に属するザゼンソウと呼ばれる植物は, 氷点下を含む外気温の変動にもかかわらず, 肉穂花序と呼ばれる部位の体温を 20°C 程度に維持できる恒温性を有する発熱植物である<sup>1)</sup>.

Fig. 1 にザゼンソウの外観と発熱の様子を, Fig. 2 に外気温とザゼンソウの体温の関係を示す. ザゼンソウの恒温維持機構に係る温度センサはその発熱器官である肉穂花序に存在し, 細胞単位で温度制御が行われている. Fig. 3 にザゼンソウを FFT 解析, アトラクタ解析, カオス解析したものを示す. これによるとザゼンソウはカオス性を持っており, その相関次元は 2.63 である<sup>2)</sup>. この植物特有の温度制御システムは, 現在汎用的に利用されている制御技術である PID 制御に比べて, 非常にシンプルなアルゴリズムでありながら優れた特性を示すことが確認されている<sup>3)</sup>.

#### 3 制御アルゴリズム

PID 制御とは温度制御をはじめとした各種制御に用いられる一般的な制御方式であ

り、温度調節計やモータの回転速度制御などで、アナログ計装の時代から現在でも使われ続けている<sup>4)</sup>。PID制御アルゴリズムは以下のような式で表される。

$$T(t) = T_0 + K_p \left\{ e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \right\}$$

$T$ : 制御対象温度,  $T_0$ : 初期温度,  $e$ : 偏差,  $K_p$ : 比例係数,  $K_i$ : 積分係数,  $K_d$ : 微分係数。

PID制御アルゴリズムには比例項, 積分項, 微分項があり, それぞれの最適な係数を設定するには困難が伴う。

一方ザゼンソウの制御アルゴリズムは, これまでの研究により下式が提案されている

$$T_s(t) = T_0 + \frac{1}{\lambda} [\eta A \Delta T_s(t) - Q_{ex}(t)]$$

$T_s$ : 肉穂花序温度,  $T_0$ : 基礎温度,  $\Delta T_s$ : 肉穂花序温度変化量,  $Q_{ex}$ : 外気温との温度差に比例した熱量,  $\lambda$ : 熱伝導率,  $\eta$ : エネルギー変換率,  $A$ : フィードバック係数。

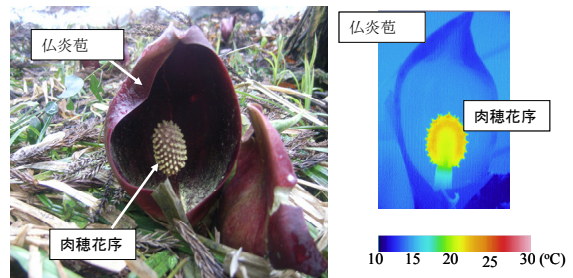


Fig. 1 ザゼンソウの外観と発熱の様子

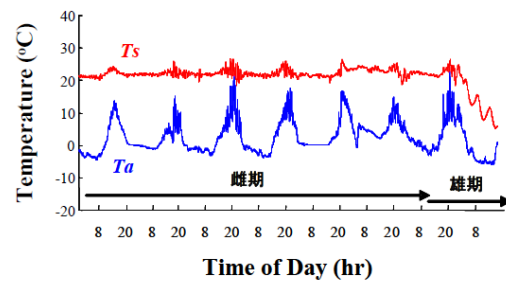


Fig. 2 外気温とザゼンソウの体温

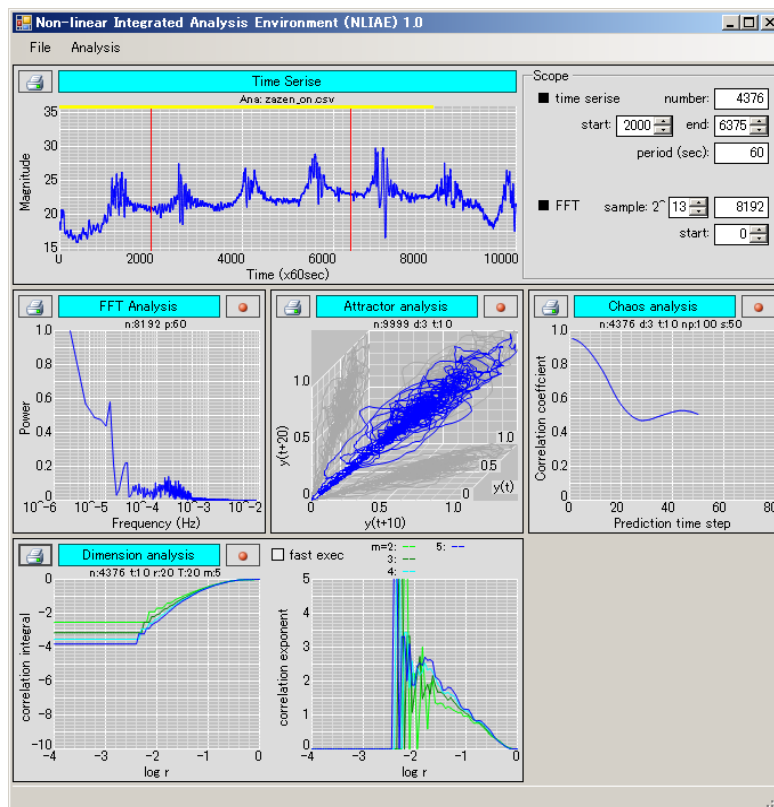


Fig. 3 ザゼンソウの持つカオス性

ザゼンソウの温度制御アルゴリズムは、自分自身の温度変化量に比例した熱量をフィードバックする制御方式となっている。同アルゴリズムは非常にシンプルであり、制御対象が非線形特性を有している場合、 $\Delta T_s$ が小さいほど制御性能が向上することが期待できる。また、同アルゴリズムは一種のモデル予測制御型アルゴリズムともいえる。そのため、制御対象の変化の兆しを捉えて、事前にアクションを起こして変動の影響を最少にすることができるためロバスト性に優れている。ザゼンソウ制御アルゴリズムのブロック図を Fig. 4 に示す<sup>5)</sup>。

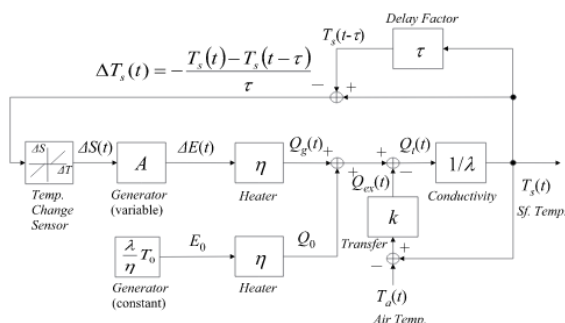


Fig. 4 ザゼンソウ制御アルゴリズムのブロック図

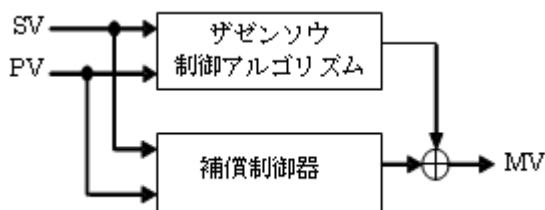


Fig. 5 ハイブリッド制御アルゴリズムの基本構造

SV : 目標値, PV : 測定値, MV : 操作量

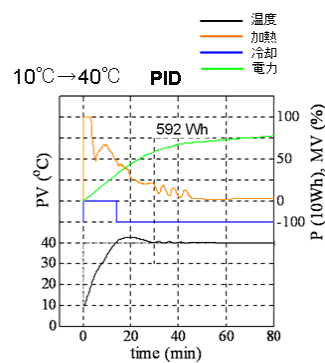
Table. 1 インキュベータによる過渡応答の消費電力比較

10°C→40°C		
	時間(min)	電力(Wh)
PID	29.7(100%)	592(100%)
ザゼンソウ	44.0(148%)	441(69%)

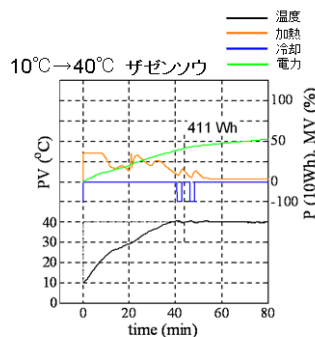
しかしながら、ザゼンソウ制御アルゴリズムのみでは目標温度に到達しない可能性があるため、実用的な制御アルゴリズムとするために何らかの方法で、その動作を補償する必要がある。Fig. 5 に、ザゼンソウ制御アルゴリズムと補償制御器を並列接続したハイブリッド制御アルゴリズムの構造を示す。

実際に、ハイブリッド制御を用いてアルゴリズムの制御性能を比較した例を示す<sup>6)</sup>。Fig. 6 は制御対象にインキュベータ (CU-351A01SPEC : TOMY) を用いて、10°Cから 40°Cに設定温度を変更した場合のザゼンソウ制御と PID 制御を比較したグラフである。また、Table.1 には目標温度に到達するまでの時間と、その時の消費電力を示す。消費電力は PID 制御よりザゼンソウ型制御のほうが 30%程度少なく、目標到達温度は 50%近く遅くなっていることが分かる。

Fig. 7 は目標温度を 25°Cとして、10 時間の定値運転を行った時の比較である。無駄な加熱出力がないため、3 割程度の消費電力の削減が見られる。

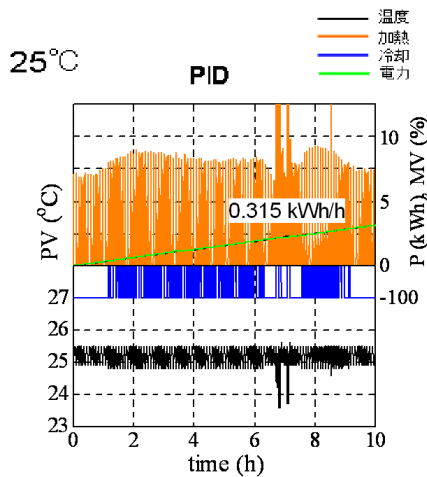


(a) PID 制御

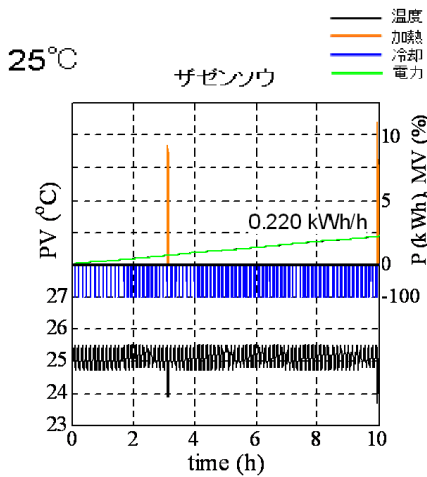


(b) ザゼンソウ制御

Fig. 6 インキュベータでの過渡応答における制御性能および消費エネルギー特性



(a) PID 制御



(b) ザゼンソウ制御

Fig. 7 インキュベータでの定値運転における制御性能および消費エネルギー

このように、ザゼンソウ制御は PID 制御に比べて消費電力が小さいことが確認されている。

#### 4 恒温槽モデルによる実験

PID 制御とザゼンソウアルゴリズムの制御特性をより自由に比較するために恒温槽モデルを作成した。Fig. 8 に恒温槽モデルの構造を示す。これは一対のペルチェ素子によりアクリル板を挟み込みアクリル板の中心に設置した T 型熱電対で温度を測定するしくみである。ペルチェ素子の外側には水冷ユニットを取り付けた。ペルチェ素子は、一方をヒータとして、もう一方をクーラとして使

用する。

熱電対を埋め込んでいるアクリル板は 1 cm 厚で製作しており、上下に 0.5 cm、または 0.2cm のアクリル板を追加して厚さを変更できるようにしている。

Fig. 9 にアクリル板の厚さを 2 cm とした時の装置の外観を示す。

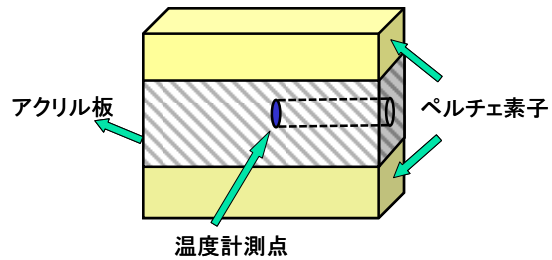


Fig. 8 恒温槽モデルの構造

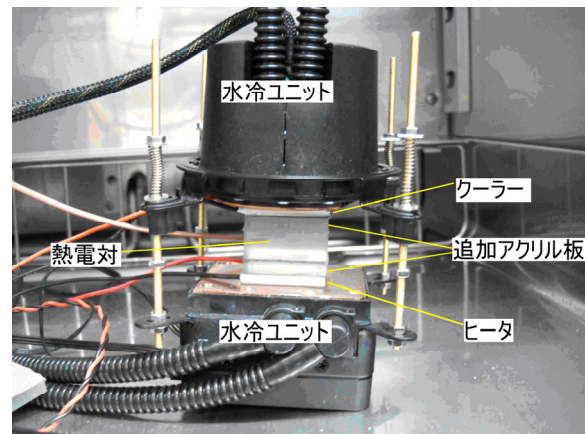


Fig. 9 アクリル板を一組追加した時 (厚さ 2 cm) の実験装置の外観

恒温槽モデルを用いて PID 制御、ザゼンソウ制御の温度特性を測定し比較した。実験環境は、恒温槽内部を 15°C、目標温度を 35°C とし、アクリル板の厚さは 2.4 cm とした。なお、PID 定数の設定にはジューグラ・ニコルスの限界感度法を用いておおまかな値を導出し、細かな設定は目視で行った。また、ザゼンソウ制御には調節計 DB1000Z を使い、大まかな値はオートチューニングで、細かい設定は目視で行った。

Fig. 10 に PID 制御とザゼンソウ制御の温度特性比較を示す。PID 制御に対して、ザゼンソウ制御は立ち上がりが遅いことや、オフセットが出ていることが分かる。立ち上がりが遅い点については、ザゼンソウ制御の出力

に制限がかかっている点が原因である。また、温度の揺れが PID 制御に比べて目立つことがわかった。

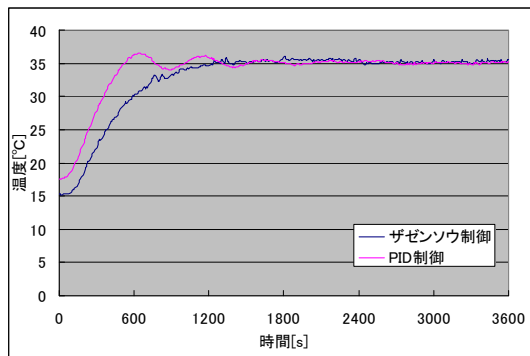


Fig. 10 PID 制御とザゼンソウ制御の温度特性比較

## 5 まとめ

ザゼンソウ制御については、PID 制御との比較をすることで、現在のザゼンソウ制御の改善点を見つけることができた。今後は、積算電力の計測、サンプリング時間を変化させることで PID 制御に対してどう変わっていくか検証を行う予定である。

## 参考文献

- 1) K. Ito, T. Ito, Y. Onda and M. Uemura, Plant Cell Physiol. 45(3):257-264(2004)
- 2) T. Ito, and K. Ito Nonlinear dynamics of homeothermic temperature control in skunk cabbage, *Symplocarpus foetidus*. Phys Rev E 72: in press (online version available #051909) (2005)
- 3) K. Takahashi, T. Ito, and H. Osada: Algorithm for temperature control in the skunk cabbage, *Symplocarpus foetidus*, *Biltechnology & Biltechnological Equipment*, Vol. 22, No. 4, pp. 959-963, (2008)
- 4) 山本 重彦, 加藤 尚武, PID 制御の基礎と応用[第 2 版], 朝倉書店, (2005)
- 5) K. Takahashi, T. Ito, Y. Onda, T. Endo, S. Chiba, K. Ito, and H. Osada: Modeling of the thermoregulation system in the skunk cabbage: *Symplocarpus foetidus*, *Physical Review E*, Vol. 76, No.3-1, pp. 031918 1-5, (2007)
- 6) 照井 翔太, ザゼンソウ型制御アルゴリズムの温度制御に関する研究, 岩手大学大学院, 修士論文, (2012)