

作成者	所属（専攻）・氏名 工学研究科電子情報工学専攻 長田 洋 連絡先（内線・メール） 6381 osada@iwate-u.ac.jp
研究課題名 （英語名）	植物発熱システムの工学的解析およびその応用 Analysis of thermogenesis in plant system and its technological application
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：（非線形ダイナミクス）（アルゴリズム）（制御システム）
研究協力者 （氏名・所属等）	千葉 茂樹（工学部技術専門職員） 高木 浩一（工学研究科電子情報工学専攻・助教授）

## 研究成果報告

### 目的

工学的アプローチにより生物現象を解析し、熱という物理要素を介した工学と生物学の有機的な連合および融合を目指すと共に、生物由来の熱工学的デバイス開発を行う。

すなわち、植物の熱制御システムの研究植物の特異な寒冷適応進化の一つ「発熱と恒温性制御システム」について、恒温発熱機構の分子生物学的解析および生物制御システムを模倣した温度制御、熱変換システムを構築する。さらに、非線形ダイナミクス等を取り入れた生物原理に基づく工学的デバイスの開発を行う。

平成16年度は、植物の発熱制御メカニズムの検討（カオス性の抽出等）を行い、温度制御アルゴリズムの再構成を検討する。

### 研究結果

発熱植物ザゼンソウ（*Symplocarpus foetidus*）から抽出した熱応答特性より、温度制御アルゴリズムを抽出ならびに再構成した。本研究で検討した制御アルゴリズム（ザゼンソウ型温度制御アルゴリズム）は、現最も広く汎用的に利用されている制御技術であるPID制御アルゴリズムに比べて、非常にシンプルでありながら優れた応答特性を示すことがわかった。

具体的には、野外で自生しているザゼンソウの肉穂花序における体温変動データを基に、線形ならびに非線形解析を行って抽出した結果、得られたザゼンソウの発熱制御に関するダイナミクス（(1)式に示す2階微分方程式で記述可能）に基づく温度制御アルゴリズム（図1）を検討した。

$$\frac{d^2Q}{dt^2} = C_1 \frac{dQ}{dt} + C_2 Q + C_3 (T_A - T_S) \quad (1)$$

ここで、 $Q$ ：発熱エネルギー、 $T_S$ ：発熱部の温度、 $T_A$ ：外気温、 $C_1$ 、 $C_2$ 、および $C_3$ ：ザゼンソウの温度特性に関する係数である。

ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムは、基本的にはフィードバック制御アルゴリズムの1形態であるが、従来の方法とは全く異なる、以下に示すアルゴリズムから構成されている。

- ①制御対象が目標値に達するまで：任意の一定値を操作量とする。
- ②目標値に達した後：制御周期あたりの制御対象の変化量がゼロになるように操作量を決定する。
- ③伝達関数に含まれる制御係数は制御対象の物理定数から決定できる。

以下に、ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムと、目標値に追従させる制御アルゴリズムとして最も一般的な制御であるPID（比例、積分、微分）制御アルゴリズムとの比較を示す（図1および2参照）。

#### i) 演算速度

PID制御では、操作量を常に目標値と現在値との偏差に比例、積分、微分要素の各係数による演算を施すことによって決定するため、毎回の演算量が多い。

一方、本アルゴリズムでは、目標値に達するまでの操作量と、目標値を維持するための操作量の演算はそれぞれ独立しており、かつPID制御方法と比較して大変シンプルである。従って、制御周期を極めて短くすることが可能であり、高速演算による高速応答に対応することや、マイクロチップ等によるハードウェア化が容易である。

#### ii) 係数の決定法

PID制御では、比例、積分、微分要素の各制御係数（図2： $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ ）は、数学的手法で導入されたものであることから、基本的に制御対象の物理特性に直結するものではないため、最適値を理論的に求めることが事実上不可能であり、それらの値を決定するためには経験的な勘もしくはカットアンドトライが必要となる。

一方、本制御アルゴリズムは実在の生物から抽出したものであるため、制御係数（図1： $C$ ）を制御対象の物理特性（温度制御の場合には熱抵抗と熱容量からなる時定数）により決定できる。従って、最適値を求めることが可能であり、その結果として、目標値への到達速度の向上や、高い安定性を実現することができる。さらに、非常にシンプルな制御アルゴリズムであることから、係数感度が比較的低く、それらの設定許容範囲を広くとることができ、したがって、容易に未知の（しかし物理特性はある程度知っている）制御対象へと適用することも可能である。

#### iii) 振動（オーバーシュート等）

PID制御には目標値に到達するために積分要素が必要であり、そのため原理的に振動が生じることを避けられない。

一方、本アルゴリズムには積分要素がないため、振動発生の原因の一つからフリーとなっている。

以上の結果と予想をふまえて、ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムに基づいて動作する温度制御装置を試作して制御特性を検証した。

図3および4は、本発明のアルゴリズムに基づいて試作した温度制御装置の概要及び外形を示す。発熱部にはペルチェ素子を、感温部には温度センサIC（LM35）を使用した。

図5は、同装置の周囲温度変化に対する温度特性を示す。同図より、同アルゴリズムによる制御は5～10℃の周囲温度の変化に対して高い安定性を示すことがわかる。

また、図6は、周囲温度を15℃一定にして、目標値を変化させた場合の過渡応答特性を示す。同図より、ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムは各目標値に対してオーバーシュートによる振動もなく素早く安定に目標値に収束していることが分かる。

以上より、ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムによる温度制御は高い恒温制御特性と、（オーバーシュートとアンダーシュートがほとんど観測されない）理想的な過渡応答特性を示すことがわかる。なお、これらの応答特性は、実用的な容量である容積30 cm<sup>3</sup>の恒温槽に応用しても同様な特性が得られている。

### 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

初年度は、主にザゼンソウ型温度制御アルゴリズムの構成の検討を行い、比較的良好な結果を得ることができたが、成果の公開という点では反省の余地があると思われる。特許申請作業も幾分かの要因にはなっているが、もう少し積極的にアピールをする必要があると思われる。来年度は論文の投稿や国際会議等での発表を積極的に行っていきたい。

また、本年度は十分なスタッフが配置できず、思うようなスケジュールで実験等ができなかったが、次年度は計画的に人員を配置して迅速な対応ができるようにしたい。

## 来年度研究計画の概略

昨年に引き続き、植物の発熱制御に関連する因子群の機能解析、および非線形ダイナミクスに基づいた制御アルゴリズムの検討を行う。

さらに、ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムに基づいた実用的な温度制御装置を作製・評価するとともに、物理現象から非線形ダイナミクスを抽出する際に使用した手法をアプリケーションソフトウェアとしてまとめる。

ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムは、従来の制御アルゴリズムと同等以上のポテンシャルを有すると思われるが、定量的な分析が全く行われていない。また、基本的に自然界に適応した恒温制御用アルゴリズムであるため、自然界にはあり得ないような条件（例えば非常に大幅で急激な温度変化）には対応できない可能性がある。以上の点は、本アルゴリズムを広く温度制御分野へ適応させるためには是非明らかにしなくてはならない部分である。そこで、以下の検討を行う。

### ・従来の制御技術との性能比較

実際に使用されている温度制御装置との制御性能の比較を行う。一般に使用されている温度制御装置には高度なチューニングアルゴリズムが搭載されているが、ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムではそのような付加的なアルゴリズムなしで同様な性能を提供できる可能性が期待される。

### ・大振幅動作に対するアルゴリズムの検討

大振幅動作を必要とする入力に対するザゼンソウ型温度制御アルゴリズムの対応を検討する。これはザゼンソウそのものには備わっていない可能性の高い応答機構であるため、本来のザゼンソウ型温度制御アルゴリズムの特徴を損なわないような改良を検討する。

## 本研究拠点形成に関連して受けた研究助成

なし

## その他特記すべき事項

### 特許

伊藤菊一, 伊藤孝徳, 長田洋, 千葉茂樹. (2004年12月8日 特許出願)

温度制御方法、及び温度制御装置

出願番号: PCT/JP2004/018297 (日本、米国、および、米国を除く全ての指定国)

## 研究成果

### 国内学会発表

伊藤孝徳, 長田洋, 伊藤菊一. 2004. ザゼンソウ型温度制御アルゴリズムの抽出と再構築の試み. 日本農芸化学会東北支部第139回大会.

高橋賢, 上川和良, 千葉茂樹, 伊藤孝徳, 伊藤菊一, 長田洋. 2004. 恒温植物の温度制御アルゴリズムの工学的応用に関する研究. 応用物理学会第59回東北支部第学術講演会.

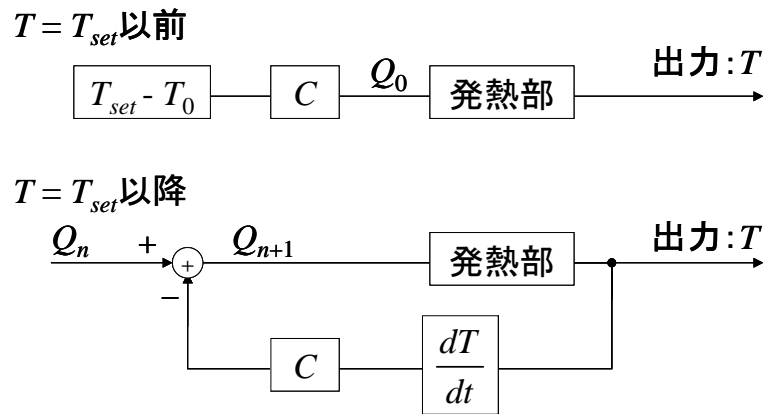


図1 ザゼンソウ発熱制御アルゴリズムに基づいた温度制御アルゴリズム

$T_{set}$ : 目標値,  $T$ : 制御対象値,  $T_0$ : 制御対象初期値,  $C$ : 制御係数,  $Q_n$ : 操作量

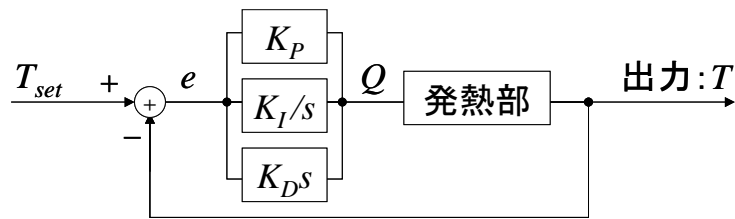


図2 PID制御アルゴリズムに基づいた温度制御アルゴリズム

$T_{set}$ : 目標値,  $T$ : 制御対象値,  $e$ : 偏差,  $K_P$ : 比例係数,  $K_I$ : 積分係数,  $K_D$ : 微分係数,  $Q$ : 操作量

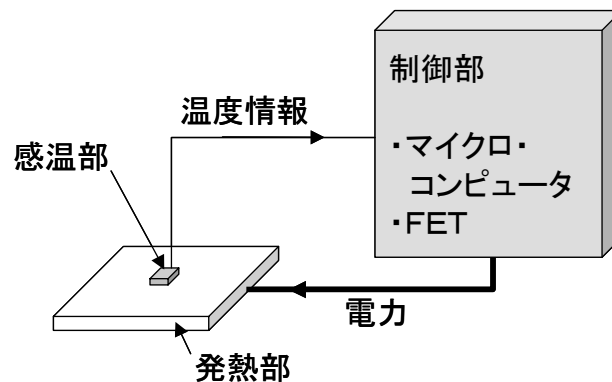


図3 ザゼンソウ発熱制御アルゴリズムに基づいた温度制御装置の概要



図4 試作した温度制御装置の外観

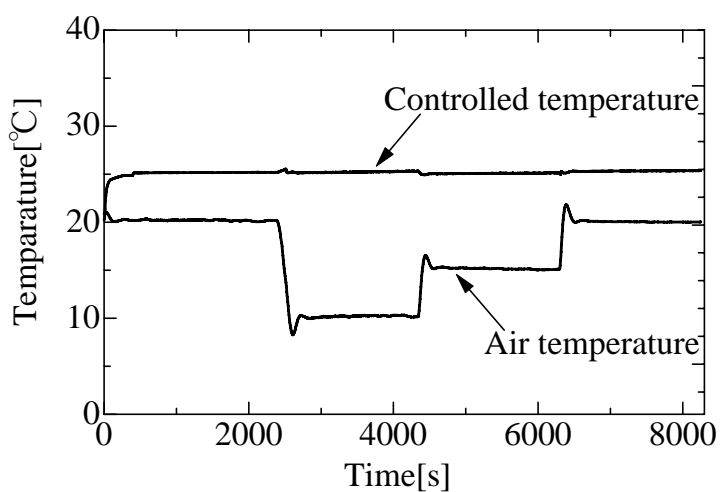


図5 恒温制御特性

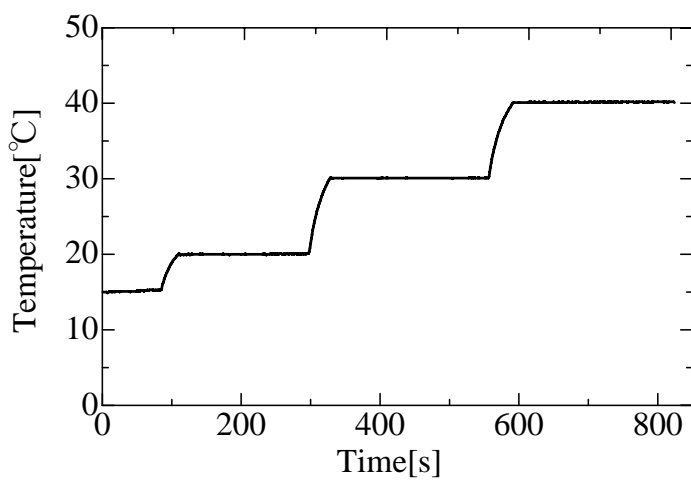


図6 任意の目標温度への過渡応答特性 (周囲温度15°C)