

## 電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究 (VI)

シミュレーションの結果に基づく PID 制御アルゴリズムの検討<sup>1)</sup>船田 周\*・橋本 康\*・大政 謙次\*  
安保 文彰\*・福屋 章博\*

愛媛大学農学部農業工学科\*

本論文では グロース キャビネットにおける DDC の制御アルゴリズムの検討が行われた。DDC における長所の一つは多種多様なアルゴリズムを組合せて制御できる点にある。グロースキャビネットにおける温湿度制御系の基本的なサンプリング PID アルゴリズムの最適係数は、前報のシミュレーションによる研究で解明されたように定常、過渡の両ステージで異なる。本論文では、湿度制御系においてはデュアルモード・アルゴリズム、湿度制御系においては定常、過渡のステージごとに最適な PID 係数を切替えるアルゴリズムが提案された。これを改良形 PID アルゴリズムと称すると、このアルゴリズムに基づく制御では通常の PID アルゴリズムにもとづく制御に比較し、IAE において 3~5 倍良好な結果をえた。

1975 年 7 月 4 日受付

## 1. はじめに

デジタル制御システムは、アナログ調節計にもとづくアナログ制御システムと異なり、制御対象であるプロセスの特性に応じて幅広い制御アルゴリズムが採用可能であり、そのアルゴリズムの選択ならびに実施はソフトウェアをきめこまかくプログラミングすることにより容易に行いうる利点を持つ。この制御アルゴリズムには、単なるアナログ制御における PID 調節計の置き換えから、予測およびプロセスへの適応までを考慮した高度の制御アルゴリズムまで種々のものが考えられる。しかし、これらのアルゴリズムを効果的に実施するに際してはプロセスの特性を十分に把握した上での検討が必要である。さて、筆者らは、前報までにおいてグロースキャビネットにおける温湿度の計算機制御系について詳細な報告を行ってきた。すなわち、第 2, 3 報<sup>1,2)</sup> では、フィ

ードバック制御では限界がある過渡状態における特性を高度な制御であるフィードフォワード制御により改善し、第 4, 5 報<sup>3,4)</sup> では、実プロセスの測定に基づくコンピュータシミュレーションから、各状態におけるサンプリング PID 制御の制御パラメータの詳細な結果をえた。本報では、これらの結果をもとに前述の制御アルゴリズムをとりあげ、現在の工業プロセスにおける DDC での制御アルゴリズムの問題点<sup>5,6)</sup>を考慮しつつ、グロースキャビネットの温湿度制御系についての制御アルゴリズムの検討を行う。

## 2. 改良形 PID アルゴリズムの提案

アナログ調節計によるフィードバック制御は一般に PID 制御式が使われている。この制御式は、理想的なアナログ調節計の場合、次式となる。

$$C(t) = K \left\{ e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (1)$$

ただし、C: 出力 e: 偏差 K: 比例ゲイン

 $T_I$ : 積分時間  $T_D$ : 微分時間 t: 時間

この制御式は  $K$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  の制御パラメータを対象とするプロセスに最適調整させ効果的な制御を行うことができる。アナログ制御の後に世に現われたデジタル制御も基本的な制御方式は、このフィードバック PID 制御を踏襲している。すなわち、(1) 式をデジタル制御に使用できるように離散形 PID 制御式に変形し、位置形

<sup>1)</sup> Shu FUNADA, Yasushi HASHIMOTO, Kenji OMASA, Fumiaki ABO, and Akihiro FUKUYA\*: Fundamental Studies on Biological Process Control by Means of Digital Computer. VI. Examination of PID Control Algorithm on the Results of Simulation of Temperature and Humidity Control in the Growth Cabinet.

\* Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Ehime University, Matsuyama.

では次式を用いている。

$$C_n = K \left\{ e_n + \sum \frac{\tau}{T_I} e_n + \frac{T_D}{\tau} (e_n - e_{n-1}) \right\} \quad (2)$$

ただし、 $\tau$ : サンプル周期

$n$ : サンプル時点

デジタル制御すなわち、DDCの初期においては、(2)式を(1)式の理想的PID制御に近づけることに研究の重点がおかれた。すなわち、数値計算上の精度を上げるための各種数値積分法の使用や、位相進みを得る目的での不完全微分法等の変形などである<sup>6)</sup>。しかし、DDCにおいてはもっと柔軟性のあるアルゴリズムが可能である。すなわち、対象とするプロセスは種々の状態で $K$ 、 $T_I$ 、 $T_D$ などの制御パラメータの最適値が異なることが多く、アナログ制御系のように単に一連の応答における平均値から求めた最適パラメータを使用することよりも、DDCのソフトウェア機能にもとづくプログラムの柔軟性を最大限に利用した、各状態ごとの最適制御パラメータの切替えや、制御モードの切替えなどを行う方がより一層制御の本質をつらぬくことになる。ここにDDCの長所があり、最近はこの面の研究が主となりつつあり、工業プロセスの分野において種々のものが報告されている。たとえば、外乱に対しては微分動作が働くが、設定値の変更に対しては微分動作が働かないように工夫したアルゴリズム<sup>7)</sup>、あるいは設定値に対して制御量がある値を越えるまでオンオフ制御を採用し、最大操作量を指示し、制御量はその値を越えるとPID制御に移る制御アルゴリズムや、制御量が整定幅以内のときはIモード、整定幅を越えたときはPDモードとサンプリング時刻ごとに制御モードを切替えるデュアル・モードの制御アルゴリズム<sup>8)</sup>がその例である。

さて、グロースキャビネットの温湿度プロセスのDDCについても上記のアルゴリズムが利用できる。すなわち、DDCを行うからにはアナログ調節計を単に置きかえるだけでなく、DDCの長所をフルに生かした制御ア

ルゴリズムにもとづくグロースキャビネットの温湿度制御系の追求が必要である。そのためには、プロセスの各種状態での制御の特性の把握が必要である。この前提として既報でのシミュレーションによる過渡あるいは定常の各状態における最適パラメータのチューニングの結果を用い、前述の制御パラメータの切り替えや制御モードの切り替えを含んだグロースキャビネットにおける温湿度制御の効果的な制御アルゴリズムとして改良形PIDアルゴリズムを提案し、その制御効果の検討を行う。

### 3. 実験結果

まず温度系について述べる。第4報の温度系のシミュレーションの結果より、温度ステップ応答において適切なパラメータは $\tau=2\text{sec}$ の場合において $K=10$ 、 $T_I=500\text{sec}$ 、 $T_D=0\text{sec}$ である。Fig. 1にこのパラメータを用いた場合の実プロセスでの制御結果を示す。確かに過渡から定常にかけての立上り時間と整定時間の両者を平均した特性は良いが、立上りや整定などについて局所的に評価するならば必ずしも最適であるとは言いがたい。とくに整定特性は悪い。このことは第4報のFig. 9により理解でき、この場合 $T_I$ は小さい方がよい。それ故、整定特性を良くするため今度は $T_I$ を変え $T_I=100\text{sec}$ としてステップ応答をみれば、Fig. 2のようにオーバーシュートが大きくなり過渡特性が必然的に悪くなる。Fig. 1, Fig. 2の制御結果から、立上りや整定など、それぞれがメジャーファクターとなる制御のステージごとに制御パラメータを切り替える制御方式が有効であると考えられる。具体的には、立上り状態でオンオフ制御のように最大操作量を操作し、目標値近傍で一変して整定を良くするようにパラメータを設定することが有効と考えられる。これが改良形PIDアルゴリズムの提起であり導入である。すなわち、立上り特性を良くするため第4報Fig. 5より、 $K=20$ とすれば最大操作量を立上りにおいて指示することが可能である。ここで $T_I$ はオー

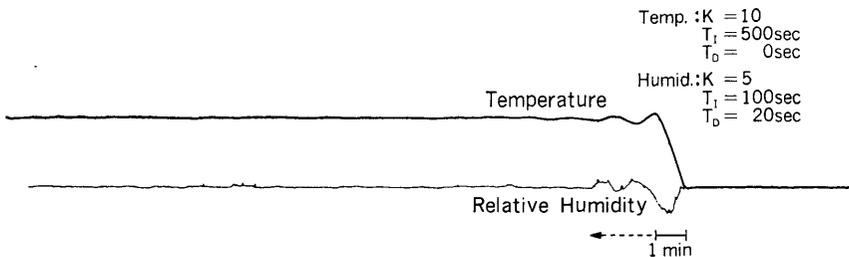


Fig. 1 Chart of process control on usual PID algorithm, namely; parameter of temperature is value of propriety in step response and parameter of humidity is valued of propriety in steady-state condition.

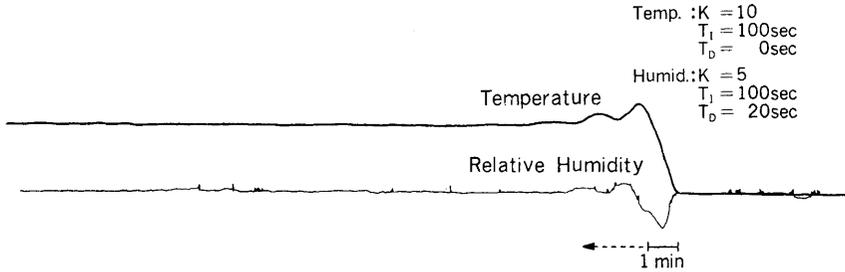


Fig. 2 Chart of process control on usual PID algorithm, namely; both parameters of temperature and humidity are values of propriety in steady-state condition.

パーシュートを助長し、 $T_D$  は立上り特性を悪くするので  $T_I = \infty \text{ sec}$ ,  $T_D = 0 \text{ sec}$  とする。他方、整定特性を良くするため目標値近傍のある値を越えてからは整定特性の良い  $K=10$ ,  $T_I=100 \text{ sec}$ ,  $T_D=0 \text{ sec}$  を採用する。この方式は、制御パラメータ切り替えのアルゴリズムであるが、P-P-I 制御モード切り替えのデュアルモード・アルゴリズムということもできる。Fig. 3 にステップ応答におけるモード状態を示す。ここで、 $T$  は制御量、 $M$  は目標値、 $t$  は時間である。A 点でステップ入力を与えられると P-モードに替わり、B 点で P-I-モードに復帰する方式である。Fig. 4 にこのアルゴリズムを用いた場合の結果の一例を示す。ここで B 点と  $T/M=1.0$  との

差を  $m$  とすると  $m=0.1$  とし、また B 点におけるリセット量は A 点におけるリセット量に、状態変化に伴う冷却量の変化に相当する値を加算した。これにより、Fig. 1 における単一モードの制御方式に比べて整定における IAE の評価は約 5 倍改善された。

次に湿度系をとりあげる。湿度系においては検出器の時定数が温度系に比較して遅いことから温度系に採用したデュアルモード・アルゴリズムは現在のところ実現し難い。そこで、定常、過渡の各ステージごとに最適の制御パラメータを選択するアルゴリズムを提起する。最適パラメータは第 5 報における湿度制御系のシミュレーションの結果より、 $\tau=2 \text{ sec}$  の場合、定常において  $K=5$ ,

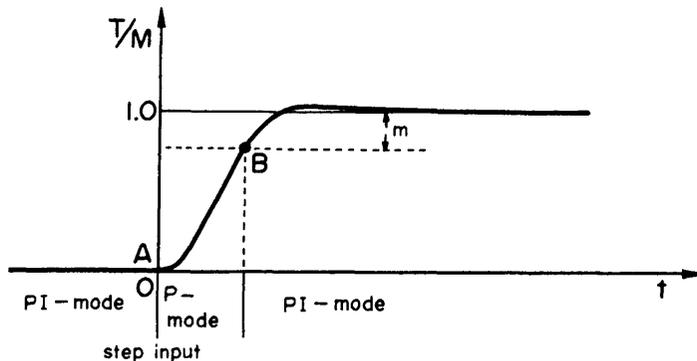


Fig. 3 Model of dual mode PID algorithm.

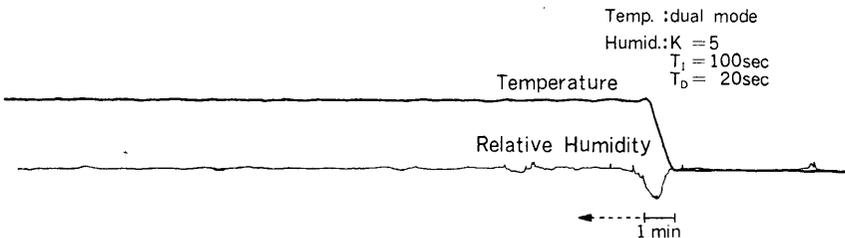
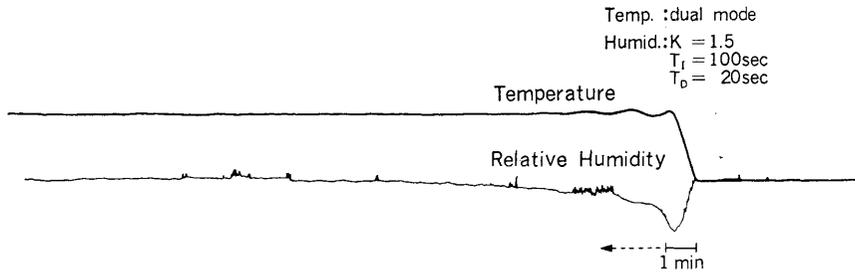


Fig. 4 Chart of process control on dual mode PID algorithm of temperature control and on optimum PID algorithm of humidity control.



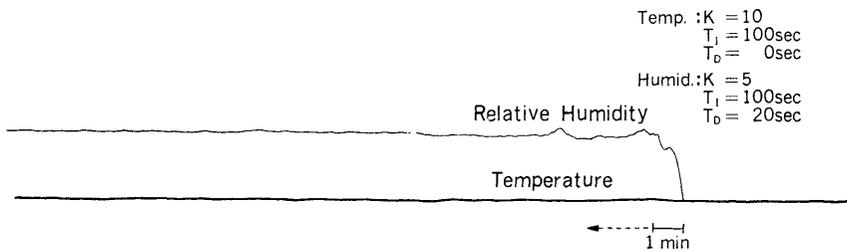
**Fig. 5** Chart of process control on dual mode PID algorithm of temperature control and on usual PID algorithm of humidity control where parameter is value of propriety in transient condition.

$T_I=100$  sec,  $T_D=20$  sec, 過渡において  $K=1.5$ ,  $T_I=100$  sec,  $T_D=20$  sec である。この値を定常, 過渡で選択するアルゴリズムで制御した結果を Fig. 4~Fig. 7 に示す。まず, Fig. 4 と Fig. 5 に湿度に対する外乱として温度ステップを与えた場合の湿度の定常特性のチャートを示す。Fig. 4 は湿度の定常における最適パラメータを選択した制御アルゴリズムによるものであり, Fig. 5 は湿度の過渡における最適パラメータを選択した制御アルゴリズムによるものである。Fig. 4 の定常特性は Fig. 5 のそれに比較して IAE 評価で約 5 倍特性が良い結果となっている。

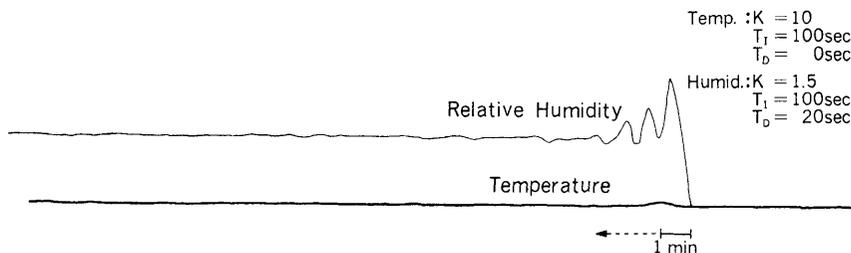
次に Fig. 6 と Fig. 7 に湿度にステップを与えた場合

の過渡特性のチャートを示す。Fig. 6 は湿度の過渡における最適パラメータを選択した制御アルゴリズムによるものであり, Fig. 7 は湿度の定常における最適パラメータを選択した制御アルゴリズムによるものである。Fig. 6 の過渡特性は Fig. 7 のそれに比較して IAE 評価で約 3 倍特性が良い結果となっている。Fig. 6, Fig. 7 は過渡を正確に把握するため制御検出端にある湿度検出器とは別に応答の速い(時定数約 2sec) 計器で記録したものである。

以上, 定常, 過渡の一つの設定例につきアルゴリズムと制御効果につき検討を行ったが, 種々の初期条件ならびに目標値変更においても同様の結果をえた。したがっ



**Fig. 6** Chart of process control on optimum PID algorithm, namely; parameter of temperature is value of propriety in steady-state condition and parameter of humidity is value of propriety in transient condition.



**Fig. 7** Chart of process control on usual PID algorithm, namely; both parameters of temperature and humidity are values of propriety in steady-state condition.

て、定常および過渡で最適な制御パラメータを選択し切替える制御アルゴリズムを採用することにより、単一パラメータでの制御アルゴリズムによる制御に比べてIAE評価で3~5倍改善されることが実証できた。

以上、温度についてはデュアルモード・アルゴリズム、湿度については定常、過渡での最適パラメータに切替えるアルゴリズムを、それぞれ従来の単一パラメータによるPIDアルゴリズムに対して改良形PIDアルゴリズムとして新たに提案し、良好な実験結果をえた。なお、改良形PIDアルゴリズムは演算時間において、従来のPIDアルゴリズムと比較してもほとんど差がみられなかったことから、今後電算機でグロースキャビネットの温湿度制御を高性能に行う場合の制御アルゴリズムの基幹となるべきものである。

#### 4. 高度な制御アルゴリズムへの展開

DDCにおいては、制御問題の高度化、複雑化に対応して高度の制御アルゴリズムが可能である。しかし、工業プロセスの分野においてもこの種のアルゴリズムに関してはまだ開発段階であり、実プロセスの実験的検討を包含する理論的体系化はいまだなされていないが、次のような問題として提起されている<sup>5)</sup>。

- (a) 予測および適応制御アルゴリズムの開発
- (b) 非線形制御アルゴリズムの開発
- (c) 現代制御理論の導入

グロースキャビネットの温湿度制御においても、系が本質的に温度と湿度の相互干渉系であることより、目標値変化に対して最短時間で最小偏差の制御を行おうとすれば、この種のアルゴリズムが必要であり、第3報においてこの問題に対する有効なアルゴリズムを提起し、実プロセスにおいてその効果を実証した。さらに、本論文で提起した改良形PIDアルゴリズムと組み合わせることにより、定常偏差の範囲内で $t-x$ チャート上を最短時間で任意に遷移させることが可能となる。この点に関しては、植物を制御ループに含めた最適制御におけるアルゴリズムの問題として順次検討していく予定である。

#### 5. あとがき

制御対象のプロセス特性、インターフェイス、DDCシステムのシミュレーションによる特性解明と順次、問題を解決し、それらの特性をふまえて電算機を最も有効に使うアルゴリズムの提起が可能となり、その有効性を実証し、ある意味で当初の目標を達成した。それゆえ本題の研究は以上により一応終了する。なお、一連の本研究ではグロースキャビネットの制御系のうち、温湿度の解明にとどまったが、空気中の微小含有ガスのDDCにつ

いては筆者の1人が本研究の延長として着手する予定である。本研究の主たる延長としては、植物生体情報処理にもとづく生育プロセスの同定と、それにもとづく本研究で解明されたDDCの諸機能をフルに活用しての最適制御へ進展していく予定である。

なお、本研究に対しては、文部省科学研究補助金一般研究A(昭和47年度、ならびに昭和49年度)が交付された。関係各位に厚くお礼申し上げます。なお、種々御援助いただいた小糸工業(株)、環境調節事業部、日本電子(株)、三菱電機(株)、東芝(株)の関係各位にもあわせてお礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) 船田 周, 橋本 康, 大政謙次, 豊住順一郎. 1973. 電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究(II). 生物環境調節 **11**: 147-155.
- 2) 船田 周, 橋本 康, 大政謙次, 岡田耕二, 安保文彰. 1974. 電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究(III). 生物環境調節 **12**: 75-80.
- 3) 船田 周, 橋本 康, 大政謙次, 安保文彰, 大塚和夫. 1975. 電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究(IV). 生物環境調節 **13**: 35-44.
- 4) 船田 周, 橋本 康, 大政謙次, 安保文彰, 大塚和夫, 野中佳昭. 1975. 電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究(V). 生物環境調節 **13**: 87-94.
- 5) 戸苅吉考, 高松武一郎. 1974. DDC系の制御アルゴリズム. システムと制御 **18**: 317-323.
- 6) 山下 直, 保志 尚. 1968. 「デジタルプロセス制御」78-148, コロナ社, 東京.
- 7) 宮崎誠一. 1970. 化学プロセスのDDC. 制御工学 **14**: 515-522.
- 8) 戸苅吉考, 後藤秀雄. 1974. Improved DDCアルゴリズムの検討. 第17回自動制御連合講演会 445-446.

#### Summary

In this paper, PID control algorithm of DDC in a growth cabinet was discussed. One of the most effective merits in DDC lies in easy attainment of control on several algorithms. Optimum coefficient of fundamental sampling PID algorithm of temperature and humidity control system in steady-state is not equal to that in transient state, which were made clear quantitatively by our previous paper on hybrid-simulation of DDC.

In this paper, dual mode algorithm for temperature control and optimum PID algorithm for humidity control on which optimum PID coefficient in steady-state and in transient state were alternated in each state, were suggested, which we called improved PID algorithm. As a result, values of IAE of control on the improved PID algorithm were three to five times as small as that on usual PID algorithm.

(Received July 4, 1975)