

## 電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究 (IV)

### 温度制御系のシミュレーションからの検討<sup>1)</sup>

船田 周\*・橋本 康\*・大政謙次\*・安保文彰\*・大塚和夫\*

愛媛大学農学部農業工学科\*

本研究ではグロースキャビネットにおける温度系の電算機制御の特性解明が、シミュレーションにより行われた。すなわち、グロースキャビネットの温度系のモデル化が行われ、アナログコンピュータでシミュレーションされ、サンプリング PID 制御がデジタルコンピュータでシミュレーションされ、 $K$ 、 $T_I$ 、 $T_D$  の各種特性が $\tau$ をパラメータとして求められた。

- 1)  $K$  の値は、操作能力  $P$  と  $\tau$  との関連で定められるべきであり、定常、過渡による特性の差も考慮した電算機制御が行われるべきである。
- 2)  $T_I$  の値は、定常で小さく、過渡では大きい方が効果的である。
- 3)  $T_D$  の値は、定常、過渡とも小さい方がよい。
- 4)  $\tau$  は小さい方が制御系の安定性がよいが、 $K$ 、 $T_I$ 、 $T_D$  を特性曲線からうまく選ぶと  $\tau=20$  sec としても系の安定性は失われない。
- 5) 検出器の時定数は、 $P$  と  $K$  との関連で検討されるべきである。

1974 年 12 月 28 日受理

#### 1. ま え が き

グロースキャビネットにおける温湿度の計算制御系につき、そのシステム設計と電算機制御の長所と考えられるフィードフォワード制御による特性改善を前報までに報告した。そこでは、電算機制御がアナログ調節計によるフィードバック方式に比較して、よりいっそう高度の制御が可能であることが実証された。しかし、電算機制御は高度な制御の可能性のみを目標とするものではなく、より効果的な実用面を期待される側面もまた重要である。すなわち負荷や目標値とのかねあいで、サンプリング周期や制御動作の定数を効果的に設定し、合理的な制御管理を行うという側面である。この要求に応えるには実プロセスの測定に基づくシミュレーションから諸パラメータを変えた詳細な検討が必要とされる。それ故、

<sup>1)</sup> Shu FUNADA, Yasushi HASHIMOTO, Kenji OMASA, Fumiaki ABO and Kazuo OTSUKA\*: Fundamental Studies on Biological Process Control by Means of Digital Computer. (IV) Simulation of Temperature Control.

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

本論文では温度制御系につき上記の目的に沿って行われたシミュレーションからの検討結果を報告する。

#### 2. シミュレーションの方法

シミュレーションを行う実プロセスの詳細は既に報告した<sup>1-3)</sup>。シミュレーションを行うに必要とされるモデリングについては、Fig. 1 で系の各部を表示するものとするとなつたような伝達関数として導かれる<sup>4,5)</sup>。

$$\mathbf{X}(S) = \mathbf{G}_p(S) \cdot \mathbf{U}(S) + \mathbf{G}_{ap}(S) \cdot \mathbf{V}_p(S) \quad (1)$$

$$\mathbf{G}_p(S) = S^{-1} \cdot \exp\left(-\frac{\gamma_a \cdot A_p \cdot l_p}{F}\right) \cdot \mathbf{B} \quad (2)$$

$$\mathbf{G}_{ap}(S) = S^{-1} \cdot \mathbf{D} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha_e \cdot C_p \cdot \gamma_a \cdot V} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\gamma_a \cdot V} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha_e \cdot C_p \cdot \gamma_a \cdot V} & \frac{-(k_a + C_v \cdot T_a)}{\alpha_e \cdot C_p \cdot \gamma_a \cdot V} \\ 0 & \frac{1}{\gamma_a \cdot V} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ただし、

$\gamma_a$ : 湿り空気の比重量 (kg/m<sup>3</sup>)

$\alpha_e$ : 壁面の熱蓄積を考慮した温度プロセスのプロセ

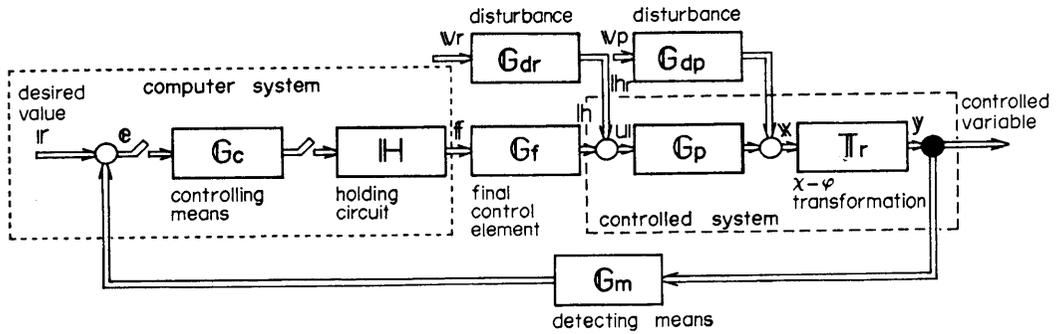


Fig. 1 Blockdiagram of temperature and humidity control system in D.C.C.

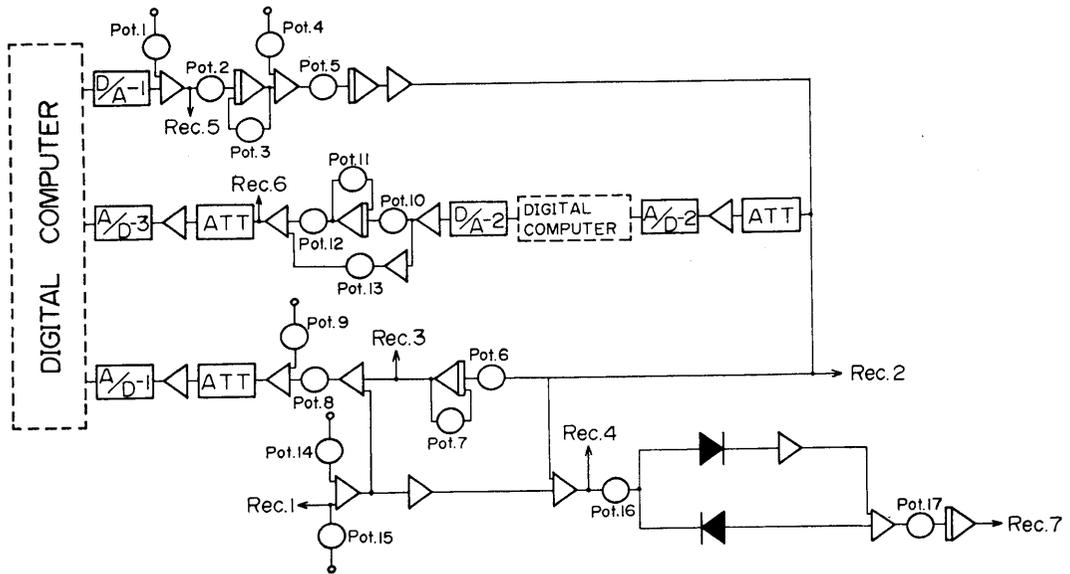


Fig. 2 Analog computer setup for temperature control system.

- No.
- Pot. 1, 9 bias for linkage between digital operation and analog operation  
 2, 3 time constant of heater  
 4 disturbance  
 5, 8 coefficient for linkage between digital operation and analog operation  
 6, 7 time constant of detecting means  
 10~13 transfer function of cooler  
 14 bias for setting initial condition  
 15 input  
 16, 17 coefficient of I.A.E.
- Rec. 1 input  
 2 temperature of controlled system  
 3 output temperature for recording  
 4 error  
 5 output from digital computer  
 6 cooling capacity  
 7 I.A.E.

- 定数  
 $C_p$ : 乾き空気の比熱 (cal/kg·°C)  
 $C_v$ : 水蒸気の足圧比熱 (cal/kg·°C)  
 $k_a$ : 0°Cの水蒸気潜熱 (cal/kg)  
 $V$ : キャビネット内容積 (m<sup>3</sup>)  
 $T_d$ : 流出循環空気の温度 (°C)  
 $A_p$ : ピストン流に関する流れ方向に直角な断面積 (m<sup>2</sup>)  
 $l_p$ : ピストン流の長さ (m)  
 $F$ : 重量流量 (kg/sec)

それ故、(1) 式をハイブリッド計算機でシミュレートした。すなわち、デジタル部で制御式、係数マトリクス、冷却除湿量等の演算とむだ時間の設定を行い、アナログ部で遅れ要素の演算等を行った。Fig. 2 にアナログ部で用いたパッチプログラムの 1 例を示す。A/D でアナログ量がデジタル量に変換されてデジタル部をなすミニコンへ入り、D/A でミニコンで演算されたデジタル量がアナログ量に変換されてアナログ部をなすアナコンへ入りという繰返し演算が行われる。A/D-1 では偏差が、A/D-2 では温度が、A/D-3 では冷却量がそれぞれミニコンに入り各種演算がなされ、その結果 D/A-1 では温度操作量が、D/A-2 では冷却操作量がアナコンへ伝達される。

以上のシミュレーションの妥当性を検定するため実プロセスの測定値との特性比較を行った例を Fig. 3 に示す。これはインディシャル応答を扱ったものであり、(a) が実プロセスの測定チャート、(b) がシミュレーションのチャートである。シミュレーションではオーバーシュートが実プロセスに比較して多少大きくなり、完全な一致は望めないが、湿度条件の差違による傾向はほとんど同一とみることが出来る。この場合の諸定数の値はサンプリング周期  $\tau=2$  sec, PID 制御における比例ゲ

イン  $K=4$ , 積分時間  $T_I=200$  sec, 微分時間  $T_D=3$  sec を共通とし、シミュレーションについてはモデリングにおける設定値として  $\alpha_e=0.1$  を使い、その他は操作部、検出部の伝達関数はそれぞれ独立に一次遅れで近似し、加熱器時定数 2 sec, 冷却器時定数 20 sec, 冷却器むだ時間 4 sec, 検出器時定数 10 sec, プロセスむだ時間 2 sec を用いた。同様にして行ったその他の例でも両特性は傾向において充分なる一致をみた。

以上より本研究で行ったモデリングでは実プロセスのシミュレーションとして充分利用できる。

### 3. 温度制御系のシミュレーション結果とその検討

次式 (6) で表わされるサンプリング PID 制御式を基本とする。

$$C_n = K \left\{ e_n + \sum \frac{\tau}{T_I} \cdot e_n + \frac{T_D}{\tau} (e_n - e_{n-1}) \right\} \quad (6)$$

ただし、 $e_n$ : 偏差  $K$ : 比例ゲイン  $T_I$ : 積分時間

$T_D$ : 微分時間  $\tau$ : サンプリング周期

ここで用いられる  $K$ ,  $T_I$ ,  $T_D$ ,  $\tau$  の諸定数が本研究でとりあげるこの種のシステムでは如何なる特性にあるかを定常、過渡の両面から求めた。 $K$  は 1°C の偏差で操作能力の 2.5% を操作するゲイン定数で  $K=2$  はその 2 倍 etc を表わし、かつ操作能力は加熱時には 10 kW の電熱ヒータ、冷却時には 1.5 kW × 2 の冷凍機によるそれぞれの熱交換量を  $P=100\%$  とした。 $T_I$  については 100~600 sec (実プロセスにおけるアナログ調節計の慣用値は 200 sec),  $T_D$  については 0~50 sec (実プロセスでは 3 sec),  $\tau$  は 2, 10, 20 sec とした。目標値変化はインディシャル応答を用い、相対湿度を 60% とし温度を 25°C から 30°C 加熱、30°C から 25°C 冷却とした。外乱は 25°C, 60% RH の定常状態で 600 cal/sec の負のステップとして与えた。これは、目標値 25°C, 60%

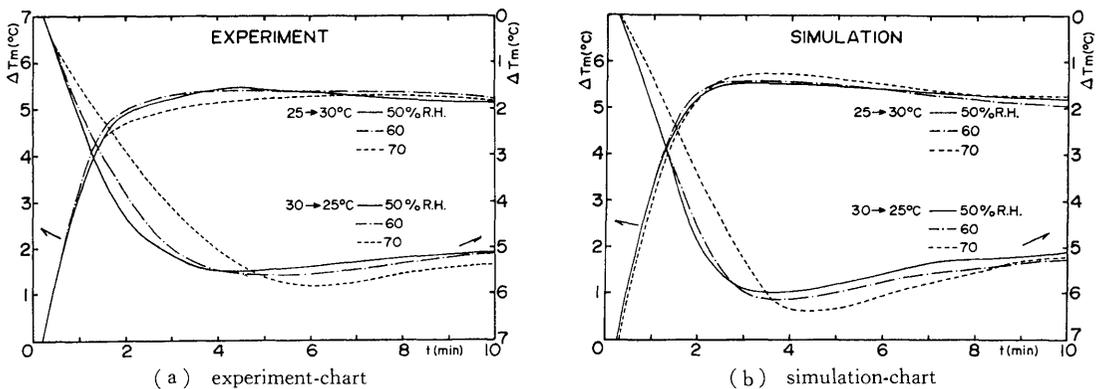
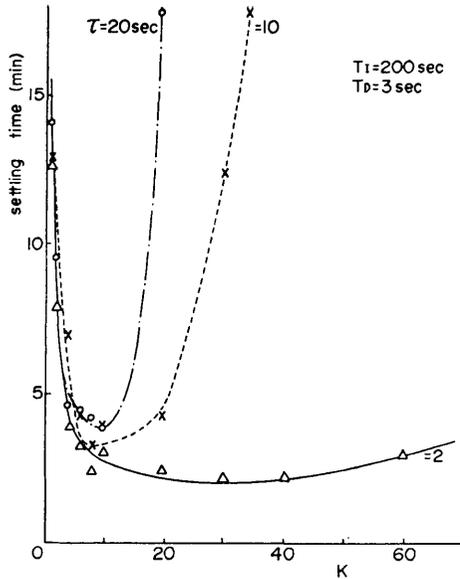
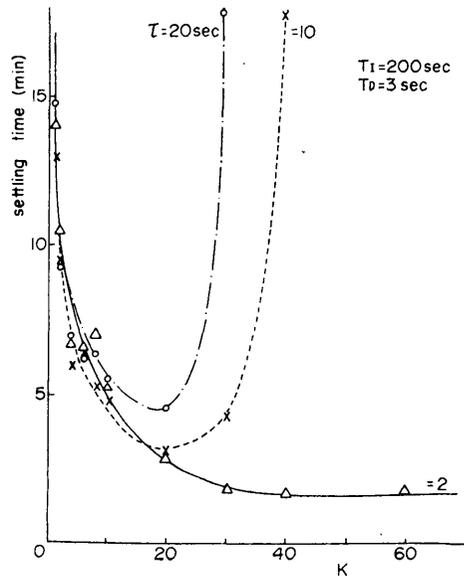


Fig. 3 Relations between experiment-chart and simulation-chart in temperature control.



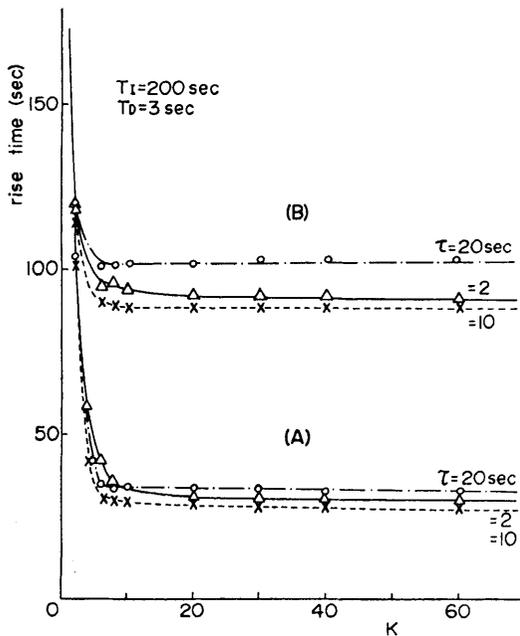
(a) case of up; 25→30°C, 60% RH



(b) case of down; 30→25°C, 60% RH

Fig. 4 Characteristic of proportional sensitivity  $K$ -10% settling time in 5°C changes of desired value.

RH で外気 20°C, 60% RH の場合, キャビネットの戸を開放し約 1/10 の容積の外気が入った概算値に等しい



(A) case of up; 25→30°C, 60% RH

(B) case of down; 30→25°C, 60% RH

Fig. 5 Characteristic of proportional sensitivity  $K$ -rise time in 5°C changes of desired value.

値である。評価は I.A.E., 整定時間, 立上り, オーバーシュートの4種を基本とし, I.A.E. は 3, 5, 10 分間平均ならびに 2% 整定, 無偏差と 5 種, 整定時間は 5, 10% の 2 種を用いた。これはシミュレーションがオーバーシュートで実プロセスに比較し誤差が見込まれるため, 誤差の少ない立上りを重視し, 総合的に評価するため 4 種の評価を併用したためである。

以下, 結果ならびにその検討にうつる。まず  $K$  につ

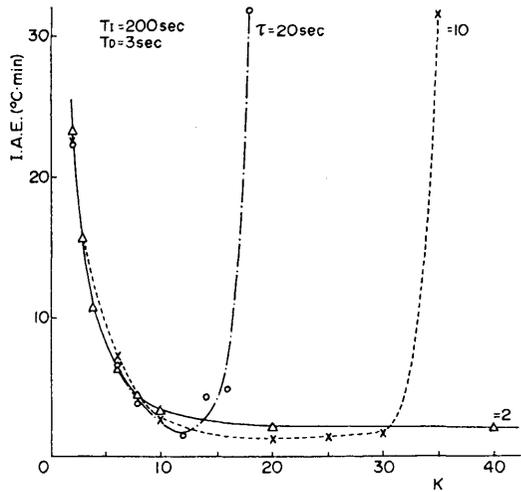
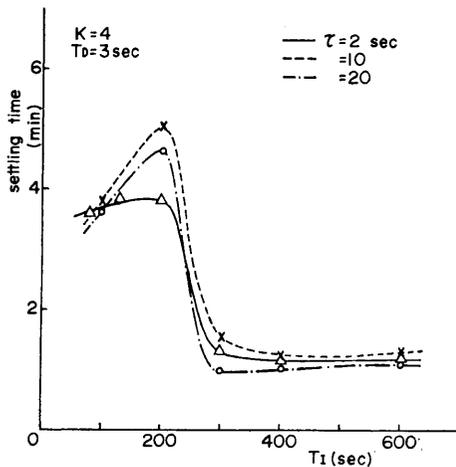
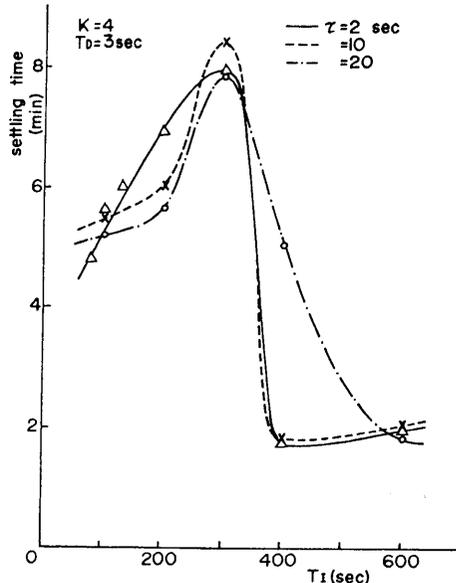


Fig. 6 Characteristic of proportional sensitivity  $K$ -I.A.E. of disturbance in steady-state condition.



(a) case of up; 25→30°C, 60% RH



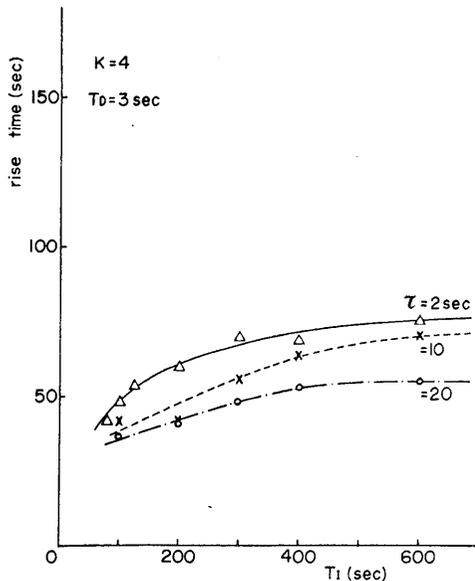
(b) case of down; 30→25°C, 60% RH

Fig. 7 Characteristic of integral time  $T_I$ -10% settling time in 5°C changes of desired value.

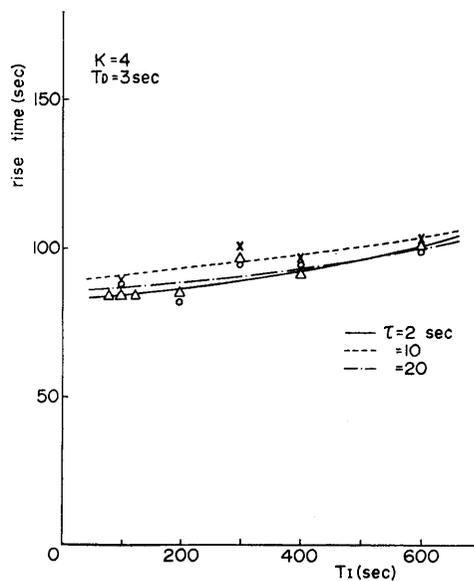
いての特性を Fig. 4~Fig. 6 に示す。Fig. 4 は 10% 整定時間からみた  $K$  の特性で、(a) が加熱 (up)、(b) が冷却 (down) の場合である。Fig. 5 は立上り時間からみた  $K$  の特性で (a)、(b) は前と同様である。これらは、いずれも目標値変化に対する過渡特性で  $\tau$  をパラメ

ータとし、 $T_I$ 、 $T_D$  は固定で  $T_I=200$  sec、 $T_D=3$  sec としてある。

次に定常における外乱による  $K$  の特性を Fig. 6 に示す。これは 2% 整定までの I.A.E. からみた  $K$  の特性で  $\tau$  をパラメータとし、 $T_I$ 、 $T_D$  は前と同様である。



(a) case of up; 25→30°C, 60% RH



(b) case of down; 30→25°C, 60% RH

Fig. 8 Characteristic of integral time  $T_I$ -rise time in 5°C changes of desired value.

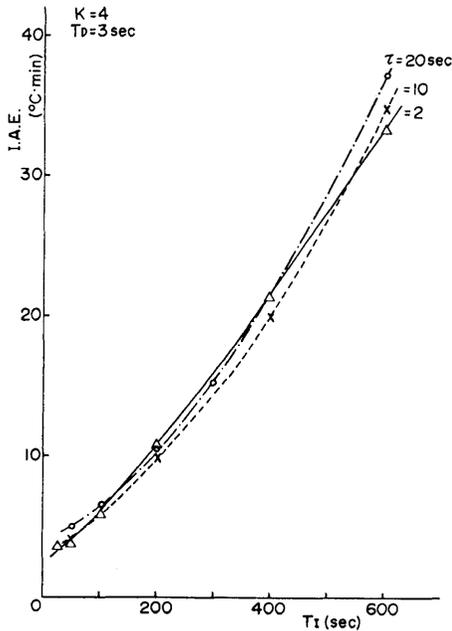


Fig. 9 Characteristic of integral time  $T_I$ -I.A.E. of disturbance in steady-state condition.

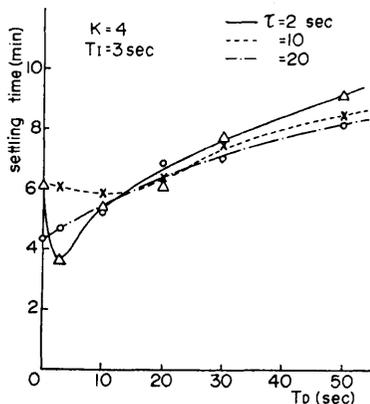
Fig. 4 の整定特性から  $\tau=2$  sec の場合は  $K>10$  (加熱),  $K>30$  (冷却) の広い範囲で評価が良いが  $\tau=10, 20$  sec では  $K$  の最適値は狭い範囲に限定される。ただ Fig. 5 でわかるように、目標値の 10~90% までの追従をみる立上り特性では、 $\tau$  の値にかかわらず  $K>10$  の広い範囲では評価が良い。それ故、目標値に整定されるまで待つのではなく立上り特性のみに注目する過渡特性はむしろ Fig. 5 を基本として検討した方がよい。

他方、定常特性は Fig. 6 より  $\tau$  の値によって大きな

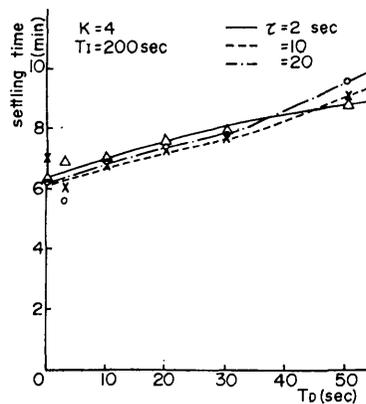
差をみせる。したがって実用的に 1 台の電算機で多くのプロセスを多数の制御変数で取扱う場合には  $\tau$  の値は大きい方が経済的なわけで、たとえば  $\tau=10$  sec の場合には  $K$  の値を 15 から 30 ぐらいにとることが望ましく、Fig. 4(a) からは  $K=10$  が望ましいことから、定常、過渡、両者の最適な  $K$  の値は多少ずれる。それ故、実用的には定常、過渡で  $K$  の値を変えて電算機制御する方が効果的である。もっとも研究室では  $\tau$  を小さくして使う場合にはこの限りではない。

つづいて  $T_I$  についての特性を Fig. 7~Fig. 9 に示す。Fig. 7 は 10% 整定時間からみた  $T_I$  の特性で (a), (b) はそれぞれ加熱、冷却に相当する。Fig. 8 は立上り時間からみた  $T_I$  の特性で (a), (b) は前と同様である。これらは、いずれも目標値変化に対する過渡特性で  $\tau$  をパラメータとし  $K, T_D$  は固定で  $K=4, T_D=3$  sec としてある。次に Fig. 9 に外乱による  $T_I$  の特性を示す。これは  $K$  のときと同様の I.A.E. からみた  $T_I$  の特性で  $\tau$  をパラメータとし、 $K, T_D$  は前図と同様である。Fig. 7(a) の整定特性から  $\tau$  の値にかかわらず  $T_I>300$  が評価が良い。(b) では  $\tau=20$  sec の場合が多少異なるが、 $T_I>400$  とみることが出来る。他方、Fig. 8 から立上り特性は  $T_I$  が小の方が望ましいことが判明する。この差異の生ずる原因は  $T_I$  の値によるオーバーシュートとの関係にあり、 $T_I$  が小だとオーバーシュートが大きくなるので整定特性が悪くなる。それ故、過渡では  $T_I$  の値は大きい方がよい。Fig. 9 からは  $\tau$  の値にかかわらず  $T_I$  が小の方が評価が良い。それ故、 $T_I$  についても定常、過渡でその値を変えて電算機制御する方が効果的である。

つづいて  $T_D$  についての特性を Fig. 10~Fig. 12 に

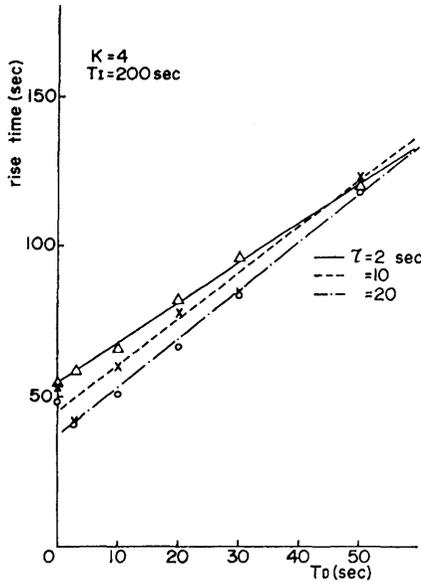


(a) case of up; 25→30°C, 60% RH

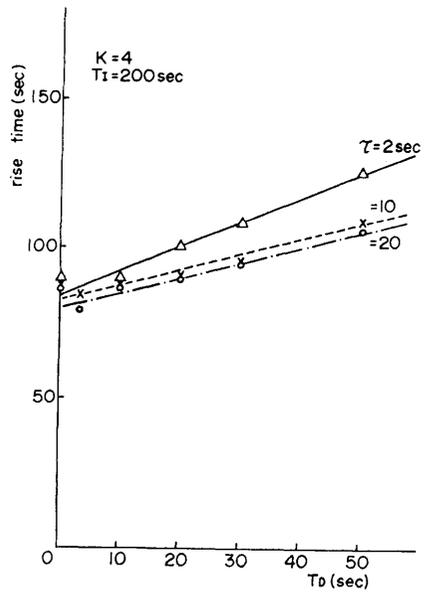


(b) case of down; 30→25°C, 60% RH

Fig. 10 Characteristic of derivative time  $T_D$ -10% settling time in 5°C changes of desired value.



(a) case of up; 25→30°C, 60% RH



(b) case of down; 30→25°C, 60% RH

Fig. 11 Characteristic of derivative time  $T_D$ -rise time in 5°C changes of desired value.

示す。Fig. 10 は 10% 整定時間からみた  $T_D$  の特性で (a), (b) はそれぞれ加熱, 冷却に相当する。Fig. 11 は 立上り時間からみた  $T_D$  の特性で (a), (b) は前と同様である。これらは、いずれも目標値変化に対する過渡特

性で  $\tau$  をパラメータとし、 $K, T_I$  は固定で  $K=4, T_I=200$  sec としてある。

次に Fig. 12 に外乱による  $T_D$  の特性を示す。これは、 $K, T_I$  のときと同様の I.A.E. からみた  $T_D$  の特性で  $\tau$  をパラメータとし  $K, T_I$  は前図と同様である。Fig. 10, Fig. 11 より  $T_D$  の値が小さい方が整定時間, 立上り時間とも短く評価は良いことが判明する。この傾向は  $\tau$  の値によらぬとみることができる。また、Fig. 12 からは外乱の特性の I.A.E. による評価がみられるが、

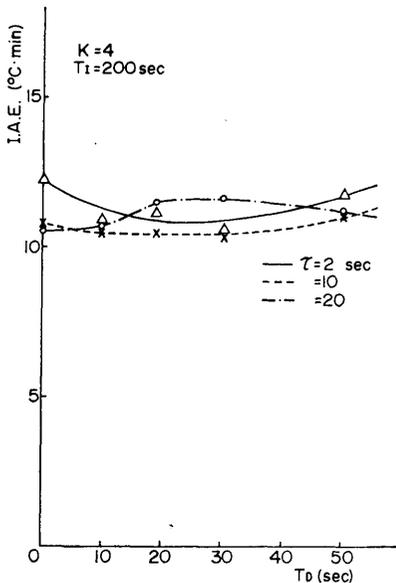


Fig. 12 Characteristic of derivative time  $T_D$ -I.A.E. of disturbance in steady-state condition.

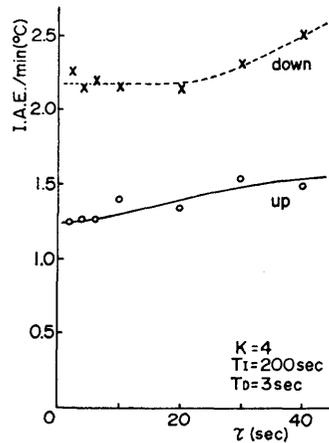
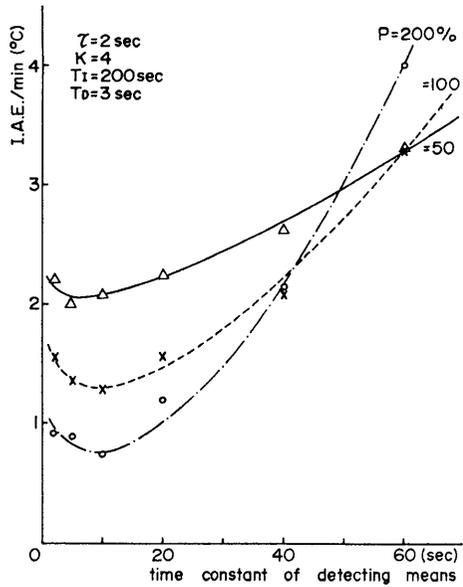
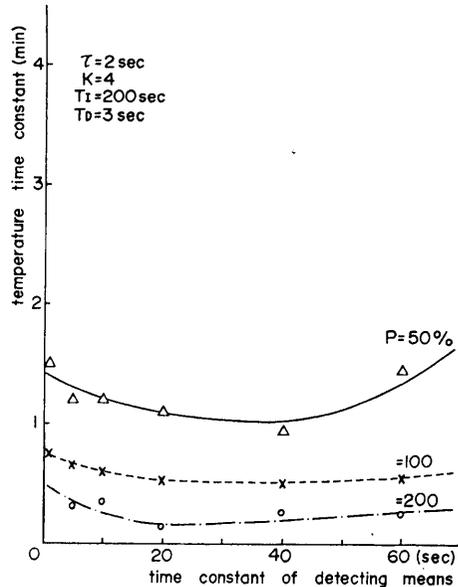


Fig. 13 Characteristic of sampling interval  $\tau$ -I.A.E. of 5°C changes of desired value.



(a) average I.A.E. for five minutes; I.A.E./min.



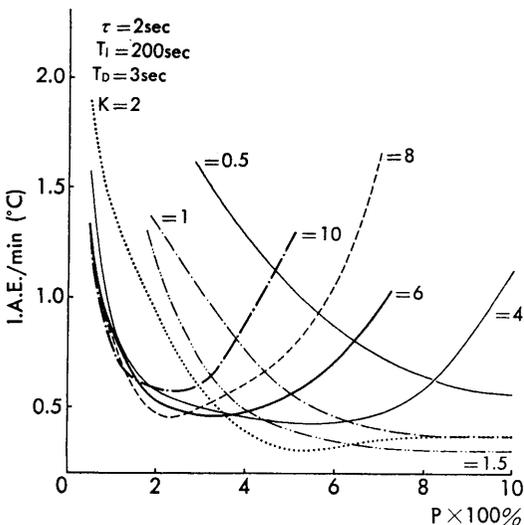
(b) equivalent time constant

Fig. 14 Characteristic of time constant of detecting means.

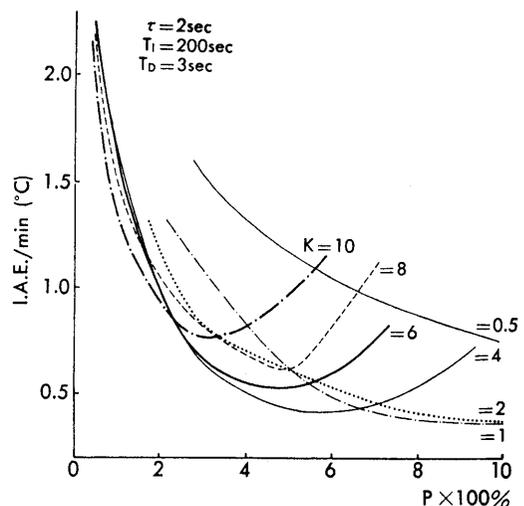
$T_D$  の値の大小による特性の変化の傾向はほとんどみられない。それ故、 $T_D$  については、Fig. 10~Fig. 12 の特性からみても定常、過渡ともにその値は小である方が適当であり、実プロセスで用いられている  $T_D=3$  sec は妥当である。

以上、 $K$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  の各定数の特性を検討した。次に、サンプリング周期に注目し、ステップ応答に対する5分

間平均の I.A.E. 評価でみた特性を Fig. 13 に示す。このグラフは  $K=4$ ,  $T_I=200$  sec,  $T_D=3$  sec の条件で求められたもので、目標値のステップが  $5^\circ\text{C}$  加熱の場合も  $5^\circ\text{C}$  冷却の場合も  $\tau$  の値が大になるにつれ評価は悪くなることが確認できる。これは既に述べた  $K$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  の特性を表わしたグラフで各々確認された  $\tau$  の特性に矛盾しない。



(a) case of up; 25→30°C, 60% RH



(b) case of down; 30→25°C, 60% RH

Fig. 15 Relation between manipulating capacity  $P$  (heating and cooling energy) proportional sensitivity  $K$ .

以上で、電算機で温度を P.I.D. 制御する場合の基本的特性が明らかになった。ところで、検出器の時定数の差異による影響もこのような系ではしばしば重要なポイントになる。この点については Fig. 14 の特性が有効な情報を与える。Fig. 14(a) では、 $5^{\circ}\text{C}$  ステップのインディシアル応答における検出器の時定数の特性が 5 分間平均の I.A.E. で評価される。Fig. 14(b) にこの応答での温度系の等価時定数を表わす。これらのグラフは  $\tau=2$  sec,  $K=4$ ,  $T_I=200$  sec,  $T_D=3$  sec の条件で求められ操作能力をパラメータとしている。これらのグラフから検出器の時定数が約 10 sec で I.A.E. の評価値は良く、すなわち最小になり、 $P$  が大すなわち系の等価時定数の値が小なるほど検出器の時定数のその最適値からのずれが I.A.E. 評価へ与える劣化の度合いが大きい。このように検出器の時定数は操作能力  $P$  の値によって系の評価に与える影響が大きくなったり無視しえたりする。それ故、最後に操作能力と  $K$  との特性を求めたグラフを Fig. 15 に示す。これは、 $5^{\circ}\text{C}$  ステップのインディシアル応答を 5 分間平均の I.A.E. で評価したもので、 $\tau=2$  sec,  $T_I=200$  sec,  $T_D=3$  sec とし、操作能力を拡張したもので、 $K$  がパラメータとして表わしてある。(a) が加熱、(b) が冷却の場合である。Fig. 15 から  $K$  と  $P$  との間には最適な特性がみられ、 $K$  の値が大きくなると操作能力  $P$  を大にするとかえって評価が悪くなるのがわかる。それ故、この種のプロセスの設計にあたっては、 $P$  の値によって  $K$  の最適値を検討することが必要である。

#### 4. 結 び

サンプリング PID 制御式でグロースキャビネットの電算機制御を行う場合、特に比例ゲイン  $K$ 、積分時間  $T_I$ 、微分時間  $T_D$ 、ならびにサンプリング周期  $\tau$  の特性が、プロセスの特性との関連で解明されねばならない。それ故、プロセスの特性をシミュレーションで与え、電算機でこのシミュレーションモデルを PID 制御し、その評価から  $K$ 、 $T_I$ 、 $T_D$ 、 $\tau$  の諸特性を求めた。次下に結論を記す。

(i)  $K$  は操作能力と  $\tau$  との関連でその適値は大きく変わる。さらに定常、過渡についても適値が異なる。また実用面か研究面かその比重の置きかたにより  $\tau$  の値の定め方が異なり、さらに I.A.E. をはじめとする各種の評価の許容限界が異なるので同様に適値が変わる。それ故、これらの仕様をまず定めてから各特性曲線より  $K$  の最適値がきめられるべきである。

(ii)  $T_I$  の値は定常で小さく、過渡では大きい方が効果的である。その適値は  $\tau$  との関連でその特性曲線か

ら決定されるべきである。

(iii)  $T_D$  の値は、定常、過渡とも小さい方が良好であり、その適値は特性曲線より決定されるべきである。

(iv)  $\tau$  を小にすると制御系の安定性は増す。他方、実用的には 1 台の電算機で多数の対象を制御したいので  $\tau$  を大にしたい要求が生ずる。この場合  $K$ 、 $T_I$ 、 $T_D$  の値をうまくえらぶと  $\tau=20$  sec にすることも可能である。

(v) 検出器の応答の良しあしは、系の操作能力の良しあしと強い関連がある。他方、操作能力と  $K$  との特性から  $K$  を適当にえらぶと操作能力の調節ができるので、その適値をえらぶと検出器の時定数の影響はある程度さけられる。

以上が本研究の結論としてえられる。

なお、本研究はデジタル PID 調節に基づいているが、これらの結論は、アナログ調節計に基づく PID 調節に関する松井、江口ら<sup>9)</sup>の結果と矛盾するものではない。

本研究は電算機制御系を温度系に限定したが、湿度についても同様に多くのデータがえられている。次報として次の機会に発表する予定である。

#### 文 献

- 1) 船田 周 他. 1973. 電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究 (I). 生物環境調節 11(3): 117-125.
- 2) 船田 周 他. 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(4): 147-155.
- 3) 船田 周 他. 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(3): 75-80.
- 4) 橋本 康 他. 1974. 生物生産プロセスにおける DDC の基礎的研究 (II). 第 17 回自動制御連合講演会論文集 No. 3071.
- 5) 橋本 康 他. 1974. 植物育成用グロースキャビネットにおける空調システムの計算機制御 (III). シミュレーションからの検討. 昭和 49 年度日本冷凍協会学術講演会論文集 No. 18.
- 6) 松井 健・江口弘美 他. 1973. グロースキャビネットの温度制御における PID 調節器の最適調整に関する研究. 生物環境調節 11(1): 31-35.

#### Summary

In this paper, characteristics of the digital computer control of temperature in a growth-cabinet were made clear by simulation. Simulation of temperature control system on modelling of a growth-cabinet was carried out by means of hybrid computer. Sampling PID con-

trol was carried out by means of digital computer.

Characteristics of  $K$ ,  $T_I$  and  $T_D$  were examined with  $\tau$ -parameter in the simulation.

- 1) Value of  $K$  should be decided upon the relations with manipulating capacity  $P$  or  $\tau$ . Computer control of temperature should be programmed in consideration of proper value of  $K$  in steady-state condition or in transient condition.
- 2) Value of  $T_I$  should be smaller in steady-state con-

dition than in transient condition.

- 3) Value of  $T_D$  should be small in either case.
- 4) Stability of temperature control is better in smaller  $\tau$ , though it is good in larger  $\tau$  ( $\tau=20$  sec.) on the condition of optimum  $K$ ,  $T_I$  and  $T_D$  from the data of simulation.
- 5) Time constant of detecting means should be examined in consideration of  $P$  and  $K$ .

(Received December 28, 1974)