

電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究 (V)

湿度制御系のシミュレーションからの検討¹⁾船田 周*・橋本 康*・大政 謙次*
安保 文彰*・大塚 和夫*・野中 佳昭*

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湿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湿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 τ 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 τ 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、過渡では 200 sec が最適値であり、定常ではより小さい値が効果的である。
- 3) T_D の値は定常、過渡とも τ の値によらず、 $3 \leq T_D \leq 20$ sec が適値である。
- 4) 検出器のおそい時定数は、適切な K を選ぶことで系への評価が悪くなるのをある程度ふせげる。

1975 年 4 月 7 日受付

1. ま え が き

前報¹⁾につづき本論文では湿度制御系のシミュレーションからの検討を行う。湿度制御系は目標値ならびに検出値が相対湿度に依存しているため、湿度制御系といっても温度を考慮して扱う必要がある。本論文では、このような意味で温度を考慮した湿度系の電算機制御をハイブリッド計算機でシミュレーションし、諸パラメータを変えてえられた詳細な結果をもとに、この種のプロセスについて明確になった諸特性を報告する。

2. シミュレーションの方法

シミュレーションの方法は前報で扱った温度の場合と基本的には同一である。すなわち、前報¹⁾ Fig. 1 で表わされるベクトル成分を(温度, 湿度)とすると、制御の基本式(1)は湿度についても適用される。具体的にハ

イブリッド計算機でシミュレートを行う場合、アナログ部のパッチプログラムが前報と異なる。Fig. 1 に湿度制御系のシミュレーションで使用されたアナログ部パッチプログラムの一例を示す。A/D-1 から相対湿度の偏差が、A/D-2 から絶対湿度がそれぞれミニコンに入り、前もってデータとして記憶されている温度との演算で、その温湿度状態における絶対湿度の変化量が求まる。その結果は D/A-1 でアナコンへ伝達され、加湿器ならびにプロセスの伝達関数を通して絶対湿度をえ、他方、D/A-2 から出る温度とあわせて相対湿度をうる。

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. 2 に示す。これは温度一定の条件下で相対湿度の 10% ステップ変動に対する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。実プロセスは高周波成分を含み、モデリングによるシミュレーションと完全な一致は望めないが、相対湿度の初期条件の差違による傾向はほとんど同じとみることができる。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 $K=2$, 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、加湿器時定数 4 sec, 除湿器時定数 4 sec, 除湿器むだ時間

¹⁾ Shu FUNADA, Yasushi HASHIMOTO, Kenji OMASA, Fumiaki ABO, Kazuo OTSUKA, and Yoshiaki NONAKA*: Fundamental Studies on Biological Process Control by Means of Digital Computer. (V) Simulation of Humidity Control.

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

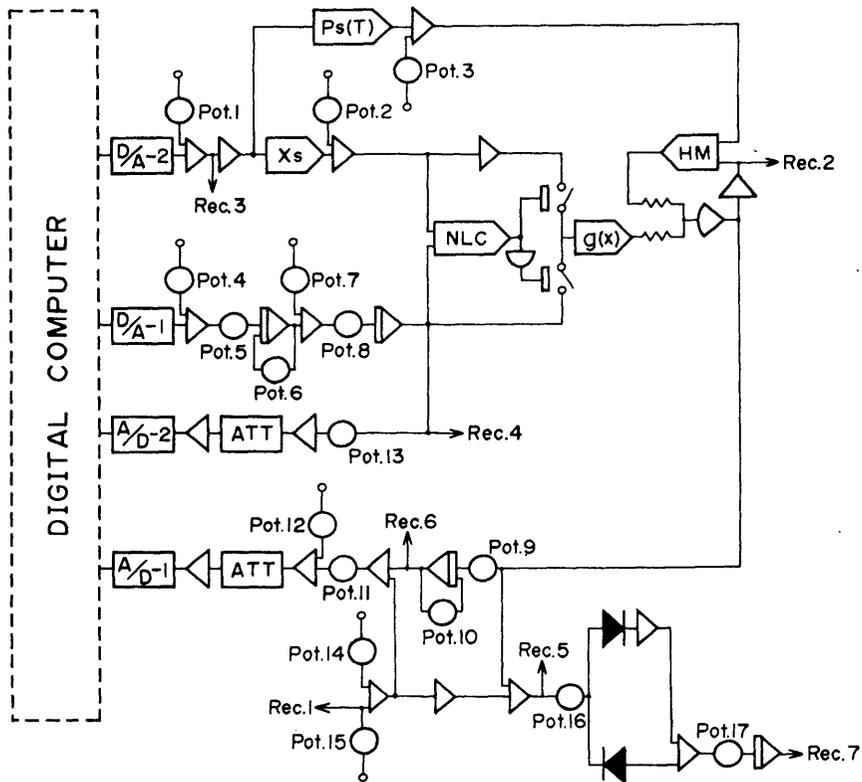


Fig. 1 Analog computer setup for humidity control system.

- No.
- Pot. 1, 4, 12 bias for linkage between digital operation and analog operation
 - 2, 3 bias for t-x chart
 - 5, 6 time constant of humidifier
 - 7 disturbance
 - 8, 11, 13 coefficient for linkage between digital operation and analog operation
 - 9, 10 time constant of detecting means
 - 14 bias for setting initial condition of relative humidity
 - 15 input
 - 16, 17 coefficient of I.A.E.
- Rec.
- 1 input
 - 2 relative humidity of controlled system
 - 3 output from digital computer
 - 4 absolute humidity of controlled system
 - 5 error
 - 6 output of relative humidity for recording
 - 7 I.A.E.
- Xs, Ps(T), g(x) function generator for t-x chart
- HM multiplier
 - NLC analog-comparator
 - ATT attenuator
 - A/D analog-digital converter
 - D/A digital-analog converter

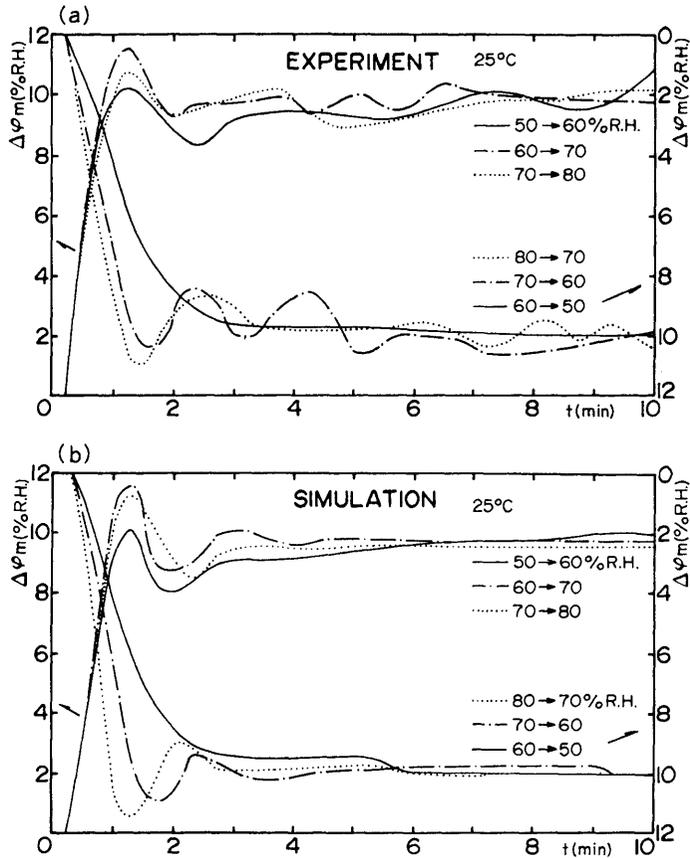


Fig. 2 Relations between experiment-chart and simulation-chart in humidity control.

(a) experiment-chart (b) simulation-chart

2 sec, 検出器時定数 35 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う湿度制御系のシミュレーションは充分利用できる。

3. 湿度制御系のシミュレーション結果とその検討

前報¹⁾(6)式で用いたサンプリング PID 制御式を基本とする。ただし K は 1% RH の偏差で操作能力の 1.25% を操作するゲイン定数で, $K=2$ はその 2 倍 *etc.* を表わし, かつ操作能力は加湿時には 1.925 g/sec の加湿器, 除湿時には 1.5 kW \times 2 の冷凍機の除湿器によるそれぞれの調湿量を $P=100\%$ とした。 T_I, T_D, τ は前報と同様とした。目標値変化はインディシアル応答を用い, 温度を 25°C とし, 相対湿度を 60% RH から 70% RH (加湿), 70% RH から 60% RH (除湿) と

した。外乱は 25°C, 60% RH の定常状態で 0.3 g/sec の正のステップとして与えた。外気 (25°C, 70% RH) がプロセス容量の 1/30 ほど介入した場合を想定した値である。評価は, 前報と同様, I.A.E., 整定時間, 立上り, オーバーシュートの 4 種を用いた。

以下, 結果ならびにその検討にうつる。まず K についての特性を Fig. 3~Fig. 5 に示す。Fig. 3 は 10% 整定時間からみた K の特性で (A) が加湿, (B) が除湿の場合である。Fig. 4 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 τ 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。

つぎに定常における外乱による K の特性を Fig. 5 に示す。これは 2% 整定までの I.A.E. からみた K の特性で τ をパラメータとし, T_I, T_D は前と同様である。Fig. 3 の整定特性から (A), (B) とともに $\tau=2$ sec では

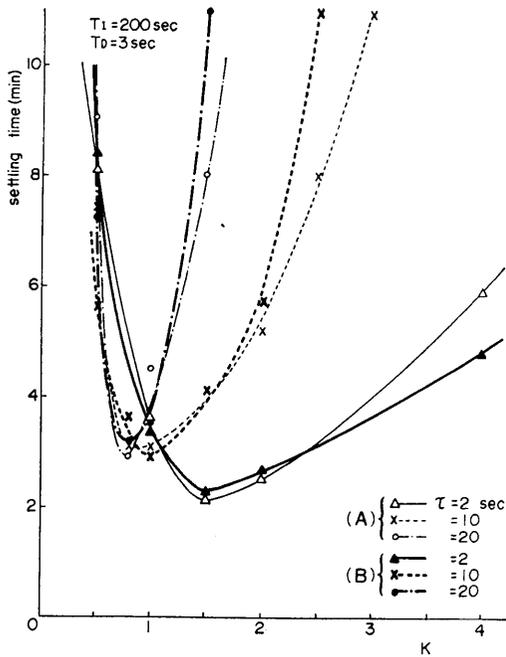


Fig. 3 Characteristics of proportional sensitivity K estimated from 10% settling time in 10% RH changes of desired value.

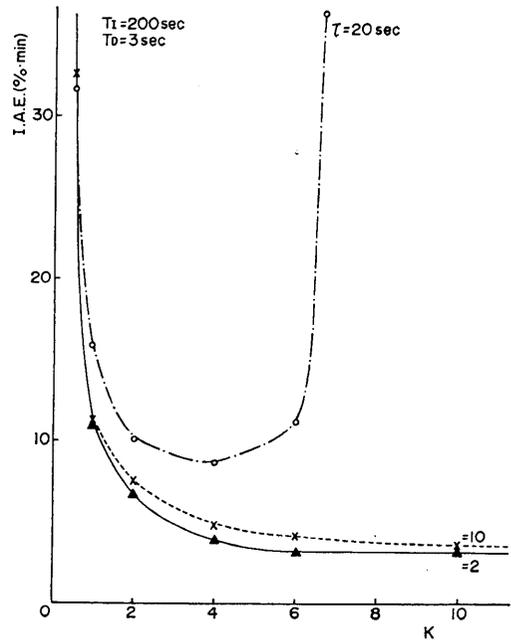


Fig. 5 Characteristics of proportional sensitivity K estimated from I.A.E. in steady-state disturbance.

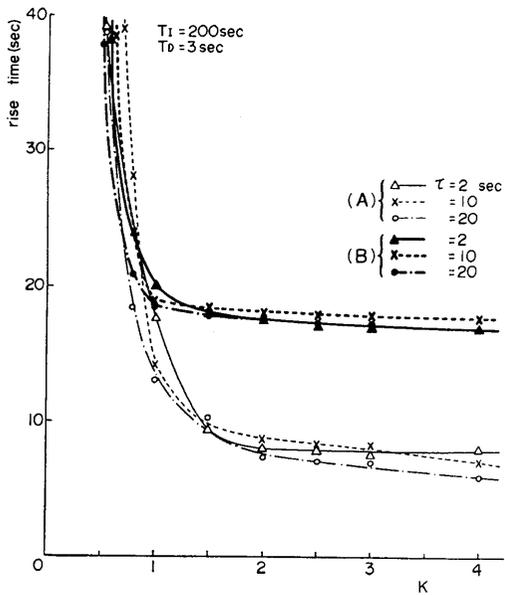


Fig. 4 Characteristics of proportional sensitivity K estimated from rise time in 10% RH changes of desired value.

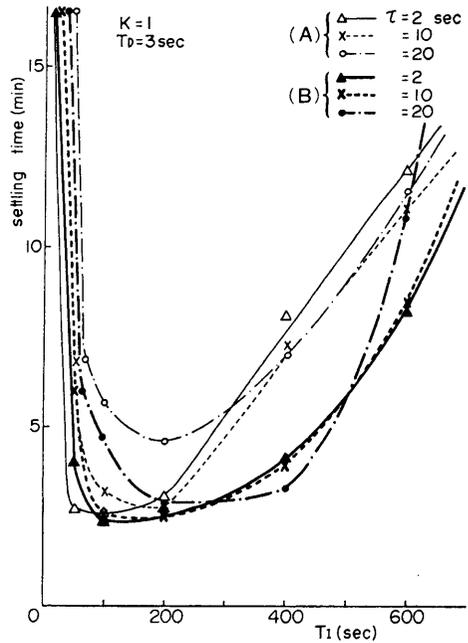


Fig. 6 Characteristics of integral time T_I estimated from 10% settling time in 10% RH changes of desired value.

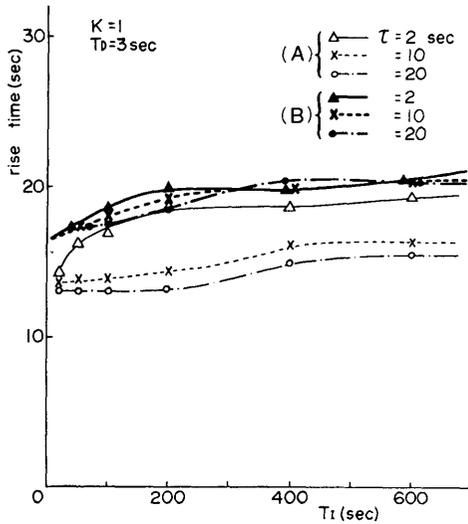


Fig. 7 Characteristics of integral time T_I estimated from rise time in 10% RH changes of desired value.

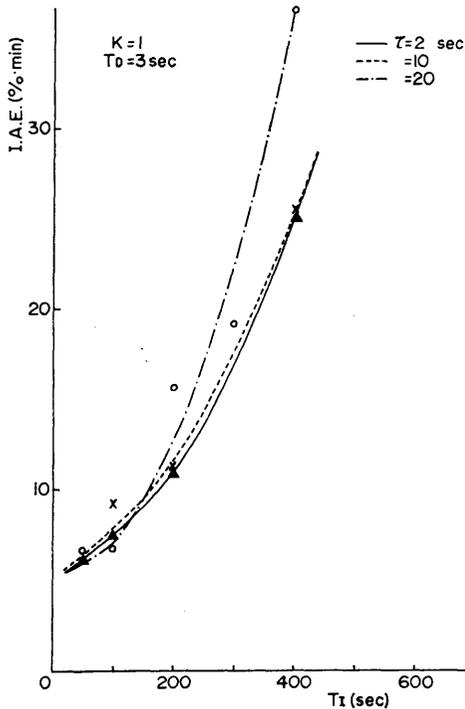


Fig. 8 Characteristics of integral time T_I estimated from I.A.E. in steady-state disturbance.

$K=1.5$, $\tau=10$ sec では $K=1$, $\tau=20$ sec では $K=0.8$ のそれぞれの近傍に最小値があり、これらの値を K の

最適値として採用すると、整定特性が最も良くなることが判明する。しかし、Fig. 4 の立上り特性からは $K \geq 1$ では τ の値にあまり影響されぬことがわかり、単なる過渡に対しては $K \geq 1$ で充分といえる。Fig. 3 と Fig. 4 とにみられる差異の理由は τ と K の両者の値が大きくなると、オーバーシュートが大きくなり、立上りの影響よりはオーバーシュートの影響が整定特性に大きな影響を与えるためである。この点については生チャートで確認されている。つぎに定常特性は Fig. 5 から $\tau=2$, 10 sec では $K \geq 4$, $\tau=20$ sec では $K \geq 4$ が望ましいことが判明する。したがって、 τ を種々変える場合には $K \geq 4$ が最適値といえる。以上より、 K については定常、過渡とそれぞれで τ の値ともみくらべながら異なる値を採用して電算機制御することが効果的である。

つづいて T_I についての特性を Fig. 6~Fig. 8 に示す。Fig. 6 は 10% 整定時間からみた T_I の特性で (A), (B) はそれぞれ加湿、除湿に相当する。Fig. 7 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 τ をパラメータとし、 K , T_D は固定で $K=1$, $T_D=3$ sec としてある。

つぎに Fig. 8 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 τ をパラメータとし K , T_D は前図と同様である。Fig. 6 の整定特性から (A), (B) とも $\tau=2$, 10 sec では T_I が 100 sec から 200 sec, $\tau=20$ sec では $T_I \approx 200$ sec が T_I の適値であることが判明する。

つづいて Fig. 7 の立上り特性からは、 τ の値によらず T_I が小さい値の方がより望ましいことが判明するが、その差はあまり顕著ではない。それ故、過渡では $\tau=2$, 10 sec では $T_I=100$ sec から 200 sec, $\tau=20$ sec では $T_I \approx 200$ sec をそれぞれ最適値としうが、Fig. 6 の $\tau=2$, 10 sec のカーブが $100 \leq T_I \leq 200$ であまり大きな変化がみられないことから、もう一步簡略化をすすめて τ の値によらず、 $T_I \approx 200$ sec が最適値であるといえる。この結果は、温度系の場合と大きく異なるが、その理由の一つとしては湿度検出器の遅れが温度検出器のそれに比べ 3.5 倍も遅いことがあげられる。つづいて定常特性は Fig. 8 から τ の値にかかわらず T_I の値が小さい方が評価が良い。それ故、 T_I についても定常、過渡とそれぞれ異なる値を採用して電算機制御をする方が効果的である。

つぎに T_D についての特性を Fig. 9~Fig. 11 に示す。Fig. 9 は 10% 整定時間からみた T_D の特性で (A), (B) はそれぞれ加湿、除湿に相当する。Fig. 10 は立上

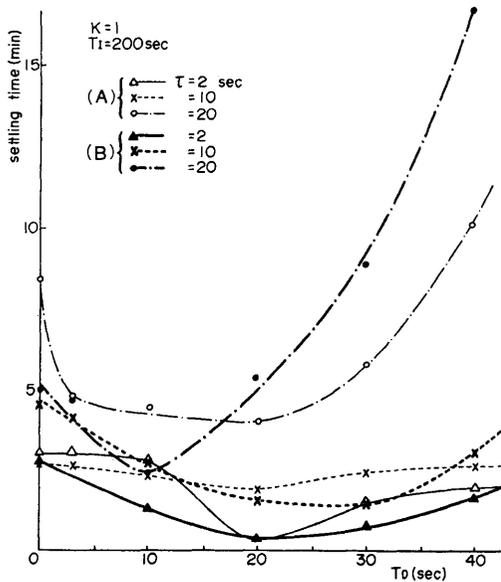


Fig. 9 Characteristics of derivative time T_D estimated from 10% settling time in 10% RH changes of desired value.

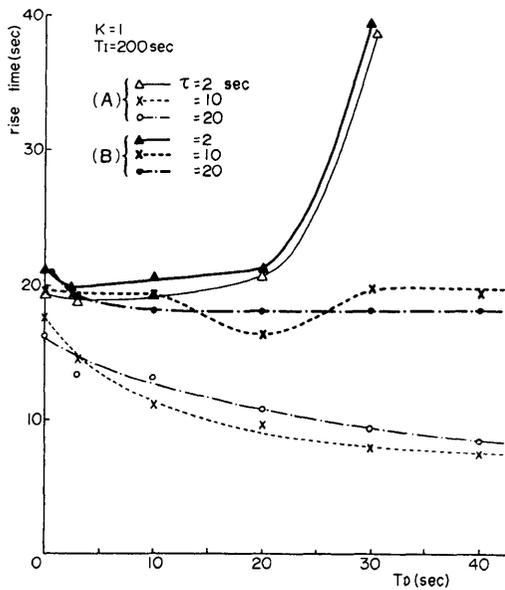


Fig. 10 Characteristics of derivative time T_D estimated from rise time in 10% RH changes of desired value.

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 τ をパラメータとし、 K 、 T_I は固定で $K=1$ 、 $T_I=200$ sec としてある。

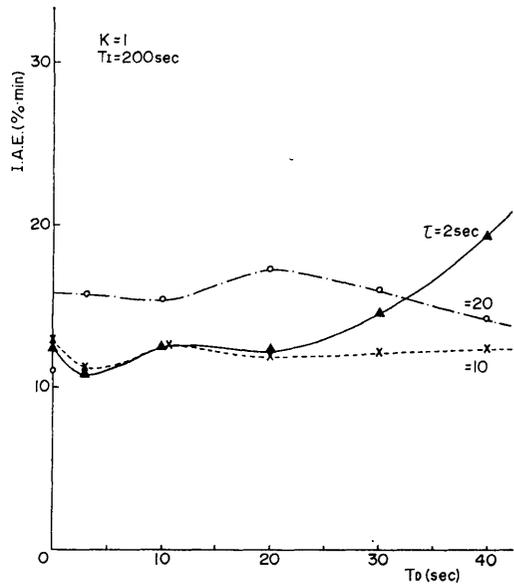


Fig. 11 Characteristics of derivative time T_D estimated from I.A.E. in steady-state disturbance.

つぎに Fig. 11 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 τ をパラメータとし、 K 、 T_I は前図と同様である。Fig. 9 から $\tau=2$ sec では $T_D \approx 20$ sec、 $\tau=10$ sec では $20 \leq T_D < 30$ がそれぞれ適値とみることができるが、その差はあまりない。しかし、 $\tau=20$ sec では T_D が 30 sec から 40 sec となるにつれてアンダーダンピングが強まることによる整定特性の劣化が著しくなる。それ故、 $\tau=20$ sec では (A)、(B) 両者からみて $3 \leq T_D \leq 20$ sec が望ましい。

つぎに Fig. 10 から、立上り特性は、 $\tau=10$ 、20 sec では T_D の値に対して大きな差異はみられない。しかし $\tau=2$ sec では $T_D=30$ 以上の大きな値になると微分作用が強まり、目標値の 60% ないし 70% から足ぶみ状態となり、目標値の 90% 到達が急速に遅くなる。それ故、 $\tau=2$ sec の場合 $T_D \geq 30$ では過渡特性が悪い。したがって Fig. 9、Fig. 10 から τ の如何にかかわらず良好な過渡特性を期待する場合には、 $3 \leq T_D \leq 20$ sec が最適値であると結論できる。

つぎに Fig. 11 から定常状態における外乱に対しては、 τ の如何にかかわらず T_D の値による大きな変化はみられない。しかし、 $\tau=2$ sec で $T_D=40$ sec では微分作用が強まり、きれいに目標値に収束しなくなるので I.A.E. 評価も悪くなる。それ故、定常でも τ の如何に

かかわらず良好な特性を期待する場合には $T_D \leq 20 \text{ sec}$ が望ましい。したがって、定常、過渡の両特性についてみると、 $3 \leq T_D \leq 20 \text{ sec}$ が適値といえる。もっとも、よ

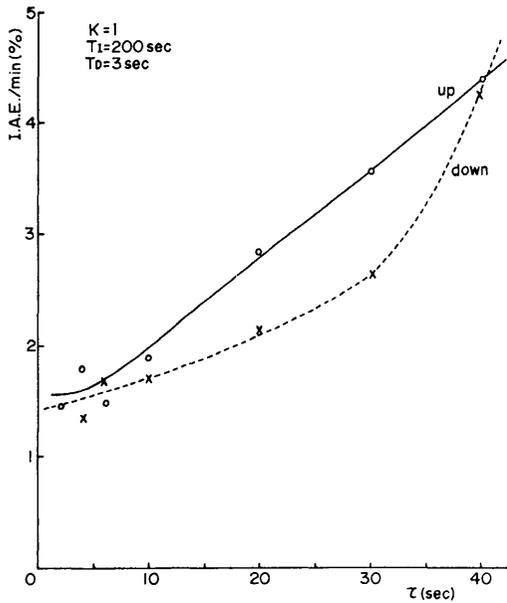


Fig. 12 Characteristics of sampling interval τ estimated from I.A.E. in 10% RH changes of desired value.

りいっそう厳密な電算機制御を行いたい場合には、 τ の当該値に対して Fig. 9~Fig. 11 よりさらに最適な T_D を求めてやり、その値を個々の場合ごとに電算機で選択して使えばよいことはいうまでもない。以上、 K , T_I , T_D の各定数の特性を検討した。

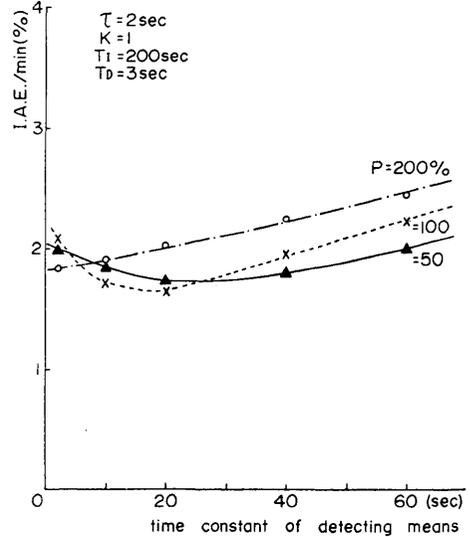


Fig. 13 Characteristics of time constant of detecting means estimated from I.A.E. in 10% RH changes of desired value.

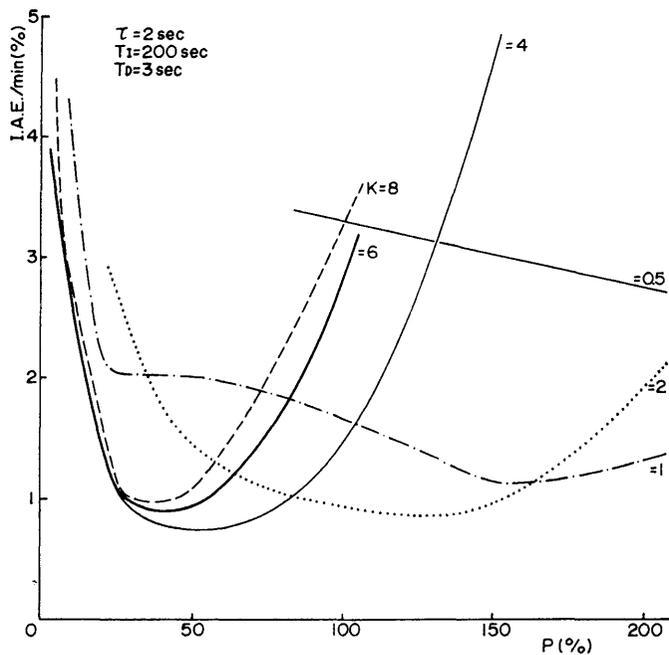


Fig. 14 Relations between manipulating capacity P and proportional sensitivity K .

つぎにサンプリング周期に注目し、インディシアル応答における5分間平均のI.A.E. 評価でみた特性を Fig. 12 に示す。このグラフは $K=1$, $T_I=200$ 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10% 加湿 (up) の場合も、10% 除湿 (down) の場合も τ 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、すでに述べた K , T_I , T_D の特性を表わしたグラフでおのおの判明した τ の特性に矛盾しない。以上で電算機で湿度を PID 制御する場合の基本的特性が明らかにされた。

その他、系の設計に対して影響を与えるものに検出器の時定数や操作能力 P の値がある。そこで Fig. 13 に検出器時定数の特性を示す。検出器時定数に対する5分間平均におけるI.A.E. 評価である。このグラフは $\tau=2$ sec, $K=1$, $T_I=200$ 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。 $P=50\%$ では、湿度検出器の時定数が20 sec で評価が最小で、20 sec から40 sec と時定数が増えただけでもその評価はあまり劣化しない。 $P=100\%$ では20 sec で最小であるが、20 sec から40 sec と増大するにつれ $P=50\%$ よりも劣化の度合いが大きい。 $P=200\%$ では時定数の最小値はさらに小さくなり、時定数の増大に伴う評価は前二者に比べて一段と悪い。このことより、検出器の時定数と操作能力は密接な関係にあり、それらの選び方によって評価は良くも悪くもなることが判明する。

つづいて操作能力と K との特性を Fig. 14 に示す。これは10% RH のステップ入力に対する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 をパラメータとして表わしてある。これは加湿の場合で除湿もほぼ同じである。グラフから K と P との間には最適な特性がみられ、 P の値が大きくなると比例ゲイン K を大にするとかえって評価が悪くなることわかる。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

グロースキャビネットにおける湿度系の電算機制御を行う場合、まず第一に明らかにする必要があるサンプリング PID 制御式に基づく比例ゲイン 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 τ の特性をシ

ミュレーションによる結果で検討した。以下に結論を記す。

(i) K は操作能力と τ , さらに定常、過渡についてもその適値は変わる。 $P=100\%$ の前提で定常では $K=4$, 過渡では $K \geq 1$ が τ を大きくとって評価が劣化しない適値である。しかし、厳密な制御をする場合には、グラフから τ の値にてらして定常、過渡、加湿、除湿ごとに最適な K を選ぶべきである。

(ii) T_I の値は τ の値によらず過渡では $T_I=200$ sec が最適値であり、定常ではより小さい値が効果的である。

(iii) T_D の値は、定常、過渡とも τ の値にかかわらず $3 \leq T_D \leq 20$ sec が適値である。

(iv) 検出器の時定数の系の評価に対する影響は操作能力と強い関連があり、操作能力は K によって調節されるので、 K の値を各特性関係からうまく選ぶと検出器の時定数の影響を少なくすることができる。

文 献

- 1) 船田 周 他. 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 (1): 35-44.

Summary

In this paper, characteristics of the digital computer control of humidity in a growth-cabinet were made clear by simulation. Simulation of humidity control system on modelling of a growth-cabinet was carried out by means of hybrid computer. Sampling PID control was carried out by means of digital computer. Characteristics of K , T_I and T_D in feed-back PID algorithm of humidity were examined with τ -parameter in the simulation.

1) Value of K should be decided upon the relations with manipulating capacity P or τ . Computer control of humidity should be programmed in consideration of proper value of K in steady-state condition or in transient condition.

2) Optimum value of T_I was 200 sec in transient condition. In steady-state condition, optimum value of T_I should be smaller.

3) Values of T_D should be optimum in the next relation; $3 \text{ sec} \leq T_D \leq 20 \text{ sec}$.

4) Time constant of detecting means was examined with the relation of P and K . In large time constant of detecting means, stability of humidity control could be allowable on the condition of optimum K and P .

(Received April 7, 1975)