

# 電算機による植物生育プロセス制御の基礎的研究 (I)

## D. D. C. 用グロースキャビネットの温湿度制御系の動特性

船田 周\*・橋本 康\*・大政謙次\*・岡田耕二\*

愛媛大学農学部農業工学科\*

本研究の目的は、デジタル電子計算機による生物生育プロセス制御の基礎的特性を検討することにある。初報として本論文では、D. D. C. を行う場合のプロセスに相当するグロースキャビネットの温湿度二変数制御系の動特性をアナログバックアップでえられた実測値から検討している。実測の結果として、温湿度二変数系の動特性に関する諸量が明らかにされた。それらのデータから、このプロセスの動特性は、D. D. C. を行うに充分の特性といえる。

昭和48年7月2日受付

### 1. 緒言

最近、電算機を利用した生物環境調節が注目されつつある<sup>1)</sup>。生物は比較的大きなむだ時間をもった一つの高度な制御系と考えられることから、その環境制御も従来の単なるフィードバック制御のみでなく、フィードフォワード制御や最適制御がむだな行き過ぎ量を減少せしめるといふ点で、より一層効果的と考えられ、電算機の導入が必然的になったとみることができる。しかし、電算機による D. D. C. (direct digital control) は、演算部とプロセス制御部とが高度にドッキングすることを前提としており、そのためには、プロセス制御、すなわち、この場合グロースキャビネットの制御系の動特性が明確にされていることが必要である。現在、D. D. C. について種種検討を加えているが、まず第1段階として D. D. C. 用グロースキャビネットの温湿度制御系の動特性につき実測からのアプローチで検討を行う。

### 2. システムの概要

Fig. 1 に対象とした高性能グロースキャビネットの温湿度系に関するブロック線図を示す。グロースキャビネ

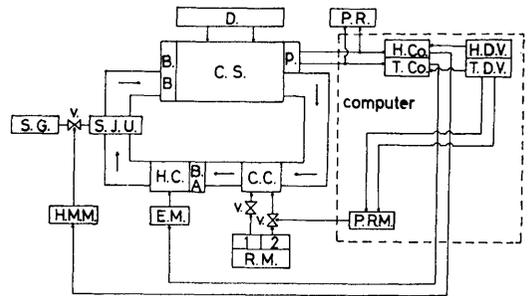


Fig. 1 Temperature and humidity control system of growth cabinet.

- C.S. controlled system
- D. disturbance
- T.D.V. temperature desired value (temp. program set station)
- H.D.V. humidity desired value (humid. program set station)
- T.Co. temperature P.I.D. controller
- H.Co. humidity P.I.D. controller
- P.R.M. program generator of the refrigerating machine
- P.R. psychrometer recorder
- R.M. refrigerating machine
- C.C. cooling coil
- E.M. S.C.R. electric manipulator
- H.C. heating coil
- S.G. steam generator
- H.M.M. humidity modulate motor
- S.J.U. steam jet unit
- B. blower
- v. valve
- p. psychrometer

<sup>1)</sup> Shu FUNADA, Yasushi HASHIMOTO, Kenji OMASA and Koji OKADA\*: Fundamental Studies on Biological Process Control by Means of Digital Computer (I). Dynamic-characteristics of Temperature and Humidity Control System in Growth Cabinet for Direct Digital Control.

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

ットのシステムの試作については松井らによる報告<sup>2)</sup>がある。さて、植物の置かれる制御対象から循環してきた空気は、2段切り換えの冷凍機 (0.75 kw×2) の冷却コイルでもって、ある一定の冷却除湿操作が加えられる。この冷凍機の一段あるいは二段の選定は、制御量の状態により行われ、プログラムジェネレータ、あるいはディジタル計算機により設定される。ここを通過した空気は、電気ヒータ (7+3 kw) を通り、ミキシングチャンバに乱気流として送られ、蒸気噴射ユニットで加湿され、送風機を通過後風向、風速がほぼ均一に整流されて制御対象に帰還される。

このシステムの制御は、常時一定の冷却除湿を前提とし、加温加湿に対しては種々の制御式により、電気ヒータおよび蒸気噴射ユニットの容量調節を行う方式によって行われる。すなわち計算機を用いない従来のシステムは、P. I. D. アナログ調節器が使用され、他方、計算機を用いたいわゆる D. D. C. システムにおいては、各種の数値計算によりフィードバック、さらには目標値あるいは外乱の変化を予測したフィードフォワード的な容量調節が行われる。

### 3. 実験方法

D. D. C. における温湿度の定常ならびに過渡特性を効果的にするための基礎データをうる目的で高性能グロースキャビネットの動特性をアナログバックアップの P. I. D. 調節器を用いて求めた。冷却除湿ベースの設定は、現在のところ経済性を考慮した最適値を論ずることがむずかしいので、その条件を制御調節器が完全加温加湿制御に近いものと考え、各々の操作量の飽和等も考慮して、常時2段運転とする。また、加温および加湿における P. I. D. 調節器は、比例感度  $P(\%) = 10, 25, 40, 100$ , 積分時間  $I(\text{min}) = 2, 5, 10$ , 微分時間  $D(\text{min}) = 0.01, 0.035, 0.05, 0.15, 0.5$  を任意に組合わせて設定した。目標値は、温度あるいは湿度のいずれか片方を固定し、他方にステップ入力を与える方式を取り、その値は、温度においては  $\pm 5^\circ\text{C}$ 、湿度においては  $\pm 10\%$  とした。

さらに、制御対象内の温湿度状態の変化に伴う動特性については、P. I. D. を温度  $P=25\%$ ,  $I=5 \text{ min}$ ,  $D=0.05 \text{ min}$ 、湿度  $P=40\%$ ,  $I=5 \text{ min}$ ,  $D=0.035 \text{ min}$  に固定し、制御対象内の温湿度初期状態を、それぞれ  $20^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ,  $50\%$ ,  $60\%$ ,  $70\%$  に変え、前述の目標値を与えた。また、P. I. D. の変化に伴う動特性については、初期状態を ( $25^\circ\text{C}$ ,  $60\%$ ) に固定し、目標値を与えた。なお、この場合の P. I. D. は温湿度とも同じ値にとった。そして、これらのステップ応答を、系の時定数

( $T$ )、過渡におけるオーバーシュート ( $O. S.$ )、最大振幅 ( $M. E. M.$ ) および定常状態における振幅 ( $M.$ ) を基準として評価した。なお本実験における加湿用のスチーム圧は  $0.6\sim 0.7 \text{ kg/cm}^2$  であった。

### 4. 温度および湿度時定数について

グロースキャビネットの温度制御系については、その整定時間に関する報告<sup>3)</sup>があり、明確にされている。本報では、温度に加うるに、湿度の動特性を同時に扱うものとする。

Fig. 2-1 に湿度状態を 50%, 60%, 70% に固定して、温度をステップ応答させたときの温度時定数を示す。なお、Fig. 2~Fig. 4 の各グラフについては、横軸に記入してある数値についてのデータにもとづき、連続曲線とした。さてこれより、 $5^\circ\text{C}$  down させた場合よりも、 $5^\circ\text{C}$  up させた場合の方が、時定数が小さいことが分かる。これは、時定数が加温および冷却の能力に影響を受けるために生じるもので、一般に冷却能力が加温能力に比べて小さいことを示す。また、高湿の状態の方が、低湿の場合よりも時定数が大きいのは、t-x chart の非線形性によって高湿の場合の方が冷却能力の不足が大きいためである。

Fig. 2-2 は、温度状態を  $20^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$  に固定して湿度をステップ応答させたときの湿度時定数を示す。これより、 $50\rightarrow 40\%$ ,  $60\rightarrow 50\%$  のとき、除湿能力不足による時定数増大がみられるが、概して各状態、各ステップとも均一な時定数を持つ。また、温度時定数と湿度時定数を比較すると、温度時定数の方が一般に大きい値を取る。

Fig. 2-3 には、P. I. D. をパラメータにしたときの湿度時定数の値、Fig. 2-4 には、湿度時定数の値を示す。前述の特性はこの場合にも顕著に表われる。比例感度  $P(\%)$  を  $P=10\sim 40\%$  の間で変化させると、 $P(\%)$  が大きくなるにつれて時定数も大きくなるが、湿度時定数については  $P=10\sim 40\%$  においては有意の差はない。ただ、Fig. 2-5 に示すように、 $P=100\%$  においては温湿度とも時定数は著しく大きくなる。積分時間  $I(\text{min})$  の変化による影響は、Fig. 2-3(a) の  $P=40\%$  の例にみる比較的  $P(\%)$  の大きい場合において顕著であり、この場合、積分時間は小さい方 ( $I=2 \text{ min}$ ) がよい。また、微分時間  $D(\text{min})$  の変化による影響は、 $D=0.035\sim 0.5 \text{ min}$  においては余り認められない。なお、本実験における風速は、 $0.55\sim 0.6 \text{ m/sec}$  であり、むだ時間は検出部から操作部までの一巡につき  $10\sim 15 \text{ sec}$  であった。

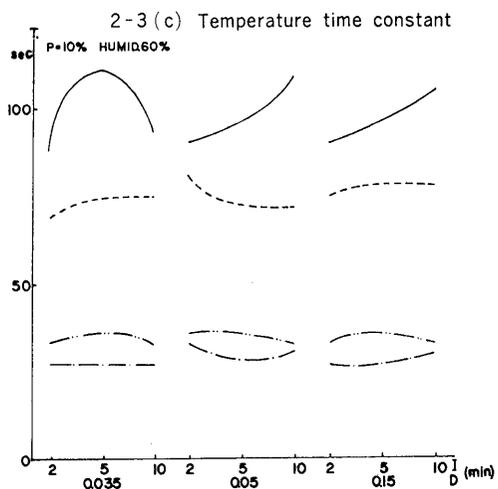
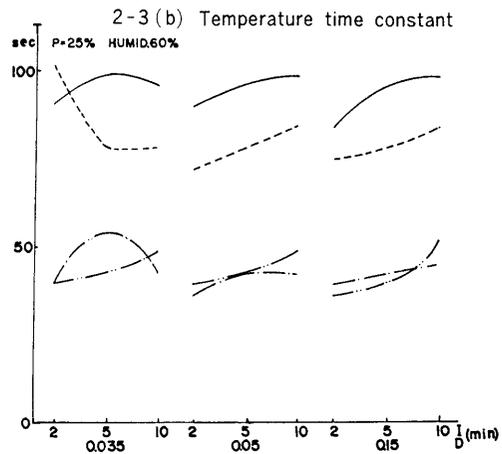
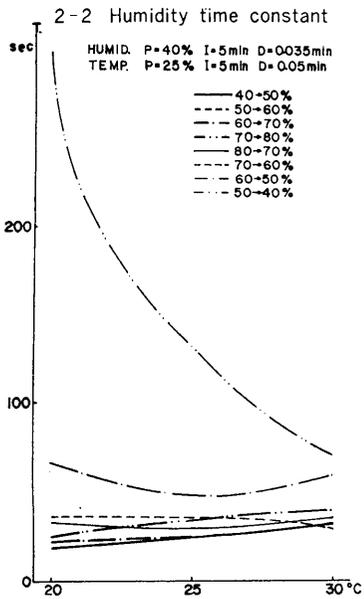
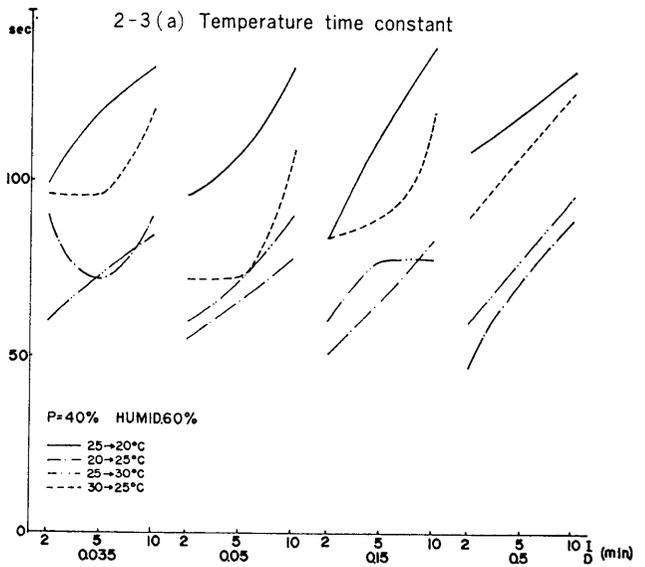
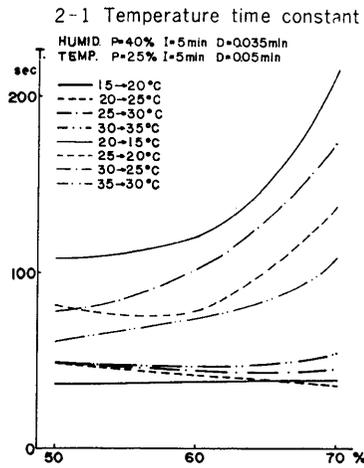


Fig. 2-1, 2-2, 2-3 Time constant in different conditions of temperature and humidity.

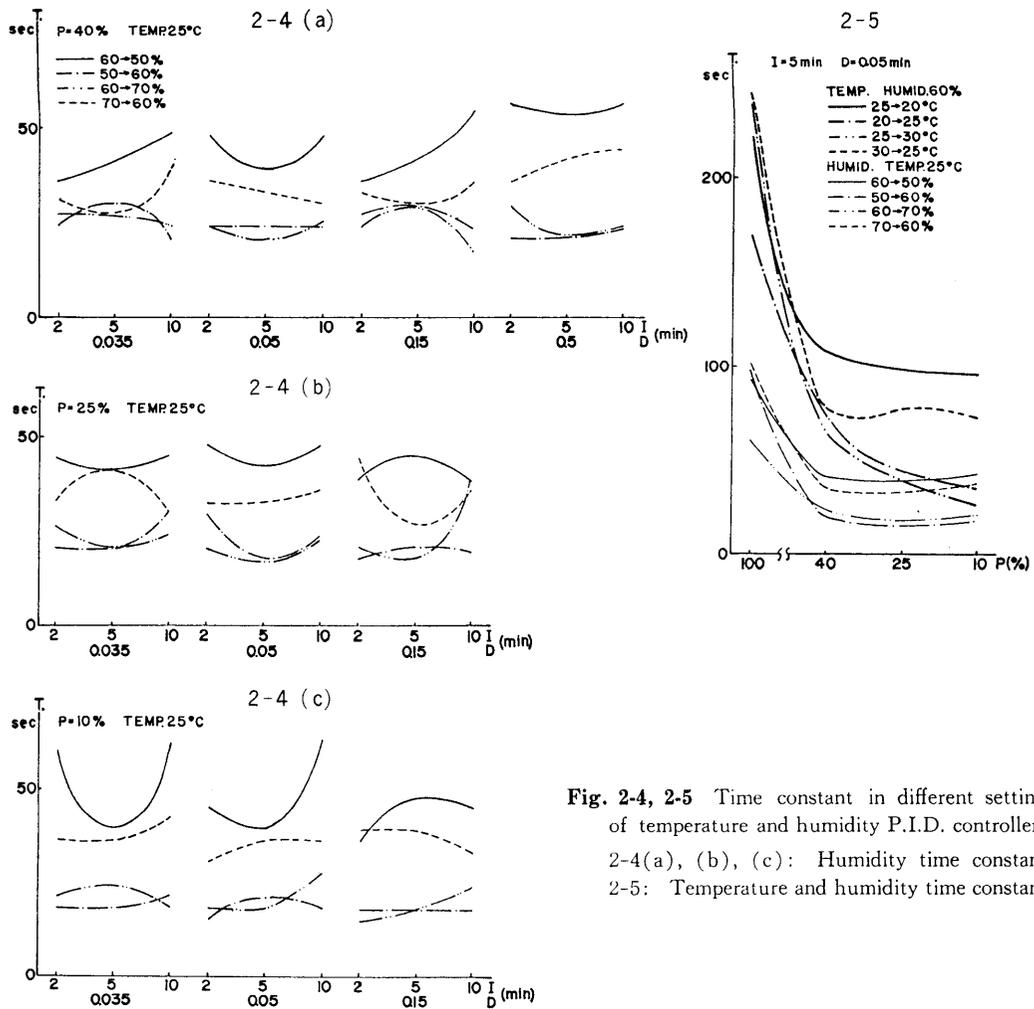


Fig. 2-4, 2-5 Time constant in different settings of temperature and humidity P.I.D. controllers. 2-4(a), (b), (c): Humidity time constant. 2-5: Temperature and humidity time constant.

### 5. 定常状態における温湿度振幅について

グロースキャビネットの定常状態における温湿度の制御精度は、松井らによりある適切な操作条件のもとで、温度  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度  $\pm 3\%$  以内であることが報告されている<sup>2)</sup>。本節では、種々の温湿度の状態および操作量について、定常特性の検討を行ったのでこれについて述べる。

Fig. 3-1 に湿度をそれぞれ 50%, 60%, 70% に固定して、温度ステップ入力を与えて定常になったときの湿度振幅を示し、Fig. 3-2 に温度を  $20^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C}$  に固定したときの湿度入力に対する定常状態での湿度振幅を示す。

Fig. 3-2 において温度状態が異なる場合、相対湿度の

t-x chart 上での非線形性が制御定常特性に及ぼす影響が示される。すなわち、これは、検出され操作部へフィードバックされる信号となる相対湿度と、操作量である絶対湿度との変換係数が、温度をパラメータとする非線形関数にならなければならないが、實際上、このアナログ調節器においては、定数として与えられるために引き起こされる。この影響による偏差振幅への対策として、計算機による制御においては、操作部への入力段階においても、絶対湿度による制御を行うことが有効と考えられる。

Fig. 3-3 に、P. I. D. をパラメータとしたときの温度目標値変化に対する定常状態での湿度振幅を示し、Fig. 3-4 に、湿度目標値変化に対する定常湿度振幅を示す。これより、 $P=10\%$  においては、非常に振幅が大きく定常

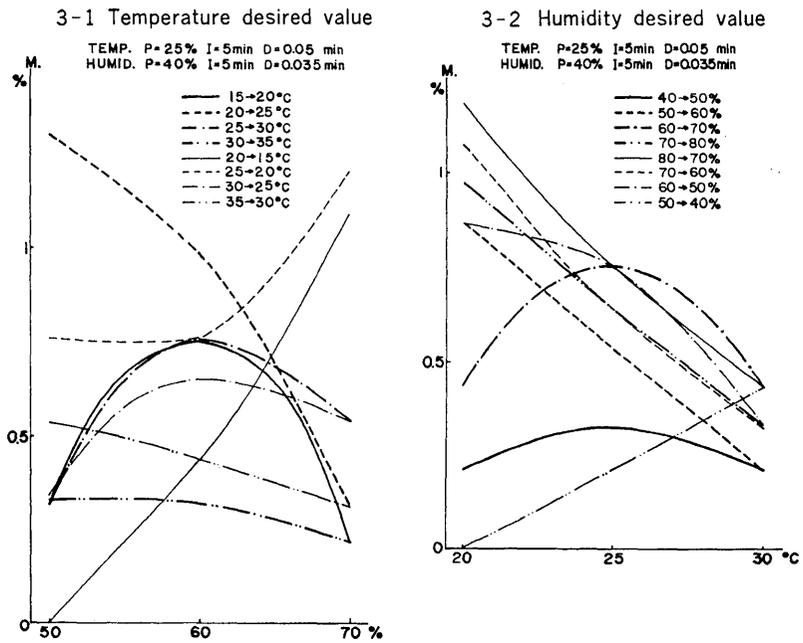


Fig. 3-1, 3-2 Humidity steady-state error magnitude in different conditions of temperature and humidity.

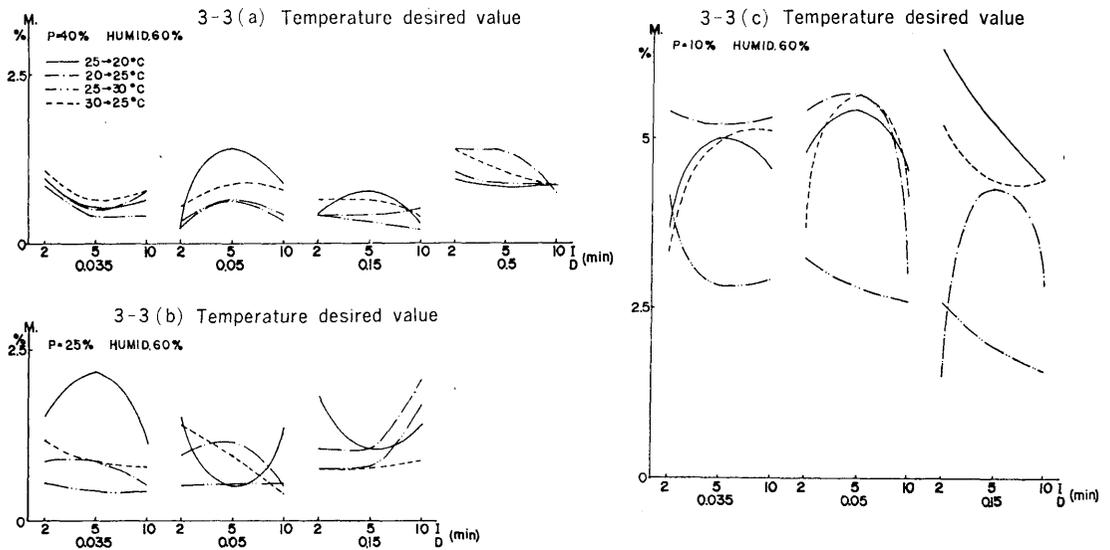


Fig. 3-3 Humidity steady-state error magnitude in different settings of temperature and humidity P. I. D. controllers.

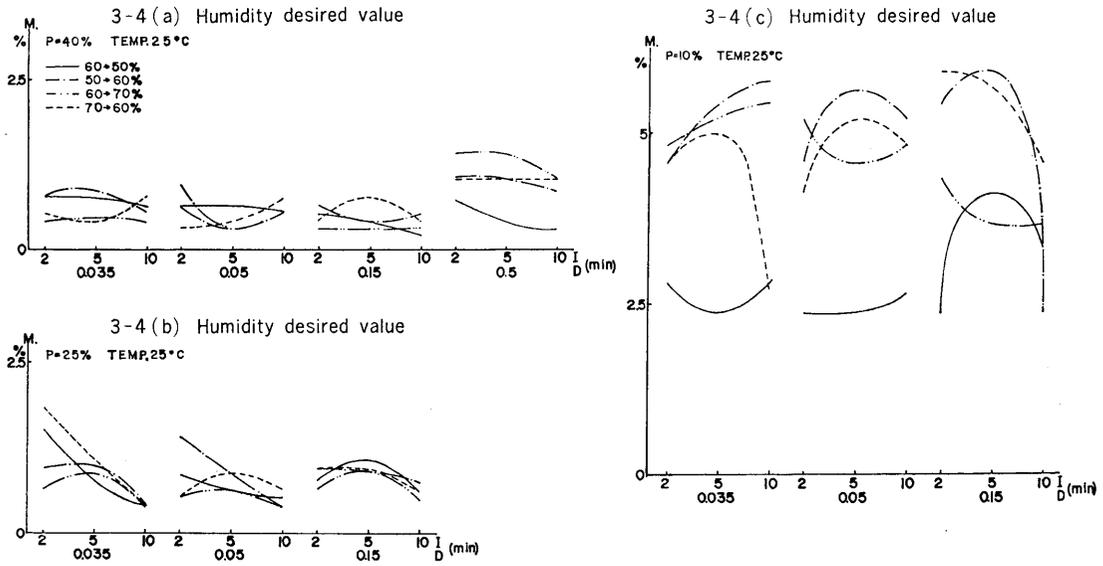


Fig. 3-4 Humidity steady-state error magnitude in different settings of temperature and humidity P. I. D. controllers.

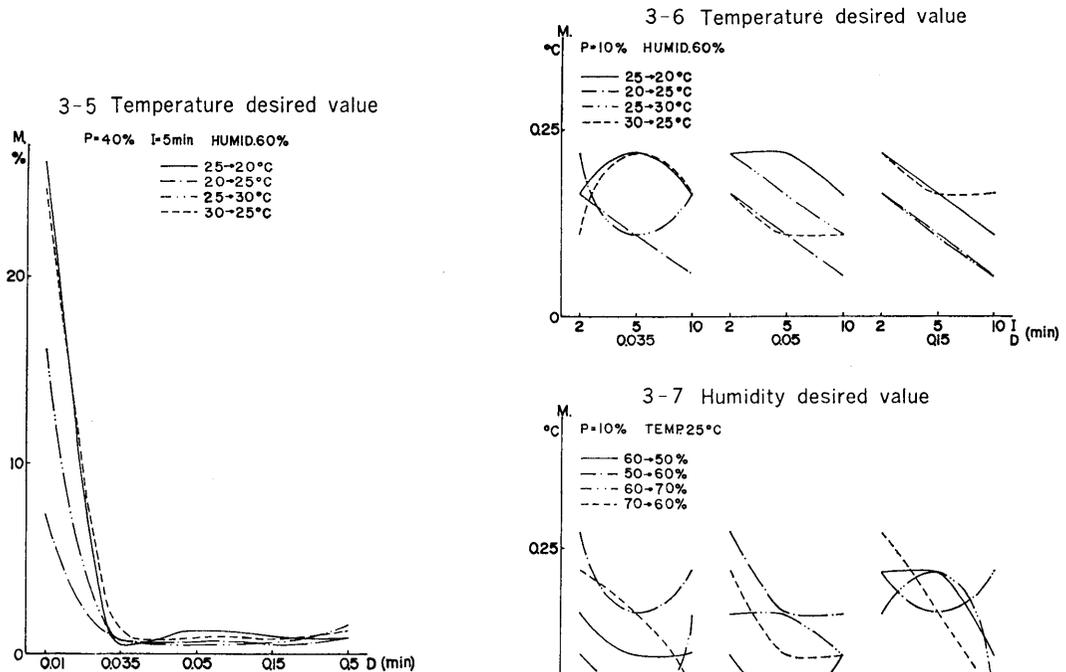


Fig. 3-5 Humidity steady-state error magnitude in different settings of temperature and humidity P. I. D. controllers.

Fig. 3-6, 3-7 Temperature steady-state error magnitude in different settings of temperature and humidity P. I. D. controllers.

特性が悪いことが分かる。

また、Fig. 3-5 には、微分時間をパラメータとしたときの定常湿度振幅を示す。この図と Fig. 3-3(a), Fig. 3-4 (a) から、微分時間は 0.035~0.15 min が定常状態で有効であり、それよりも大きくても小さくても評価は悪いことが分かる。

Fig. 3-6, Fig. 3-7 に  $P=10\%$  における温度振幅を示す。なお、 $P=100, 40, 25\%$  においては温度振幅は、ほとんど零であった。これより、温湿度系においては定常振幅での評価からみれば、 $P=25\sim40\%$ 、 $I=5\sim10$  min、 $D=0.035\sim0.15$  min が有効である。

なお、これら P.I.D. 値は各々のシステム、および制御量に支配されるものであって、この意味からも絶対量での制御がなされるべきである。

## 6. 湿度のオーバーシュートと最大振幅

本節では、一般的に評価の悪い湿度について述べ、比較的評価のよい温度については、湿度変化の因子として取り扱う。

Fig. 4-1 に、湿度を固定した場合の温度変化に対する湿度の最大振幅を示し、Fig. 4-2 に、温度を固定した場合

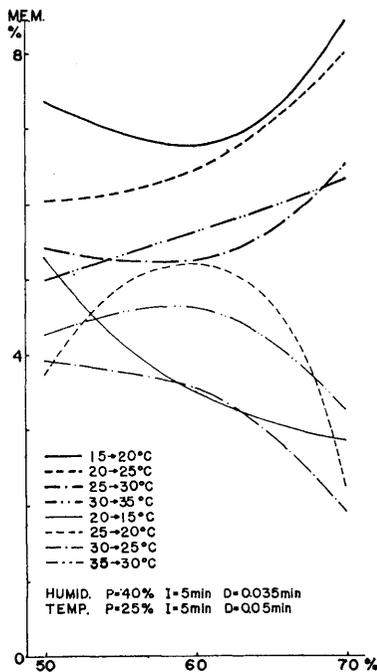


Fig. 4-1 Maximum humidity error magnitude upon variable parameter of temperature in different initial conditions of temperature and humidity.

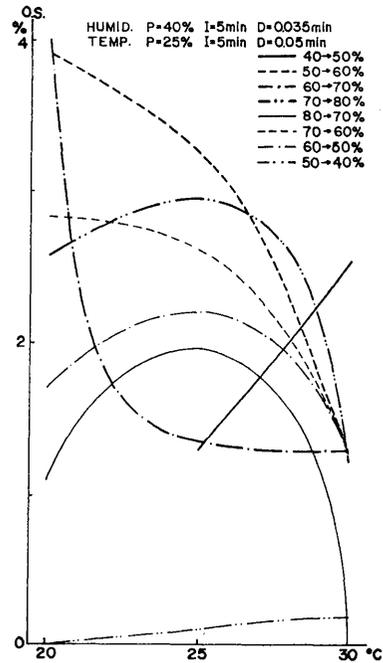


Fig. 4-2 Over shoot upon variable parameter of humidity in different initial conditions of temperature and humidity.

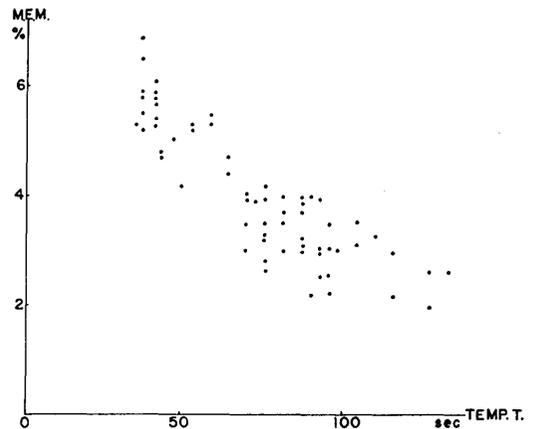


Fig. 4-3 Linear relation between temperature time constant and maximum humidity error magnitude.

合の湿度変化に対する湿度のオーバーシュートを示す。Fig. 4-1 において、目標値を up させる場合には右より、down させる場合にはその逆になる。これは、up の場合が  $t-x$  chart の非線形性によるもので、down の場合が、温度時定数の違いにより生じるものである。これは、時定数と最大振幅の関係を表わした Fig. 4-3 によって示される。

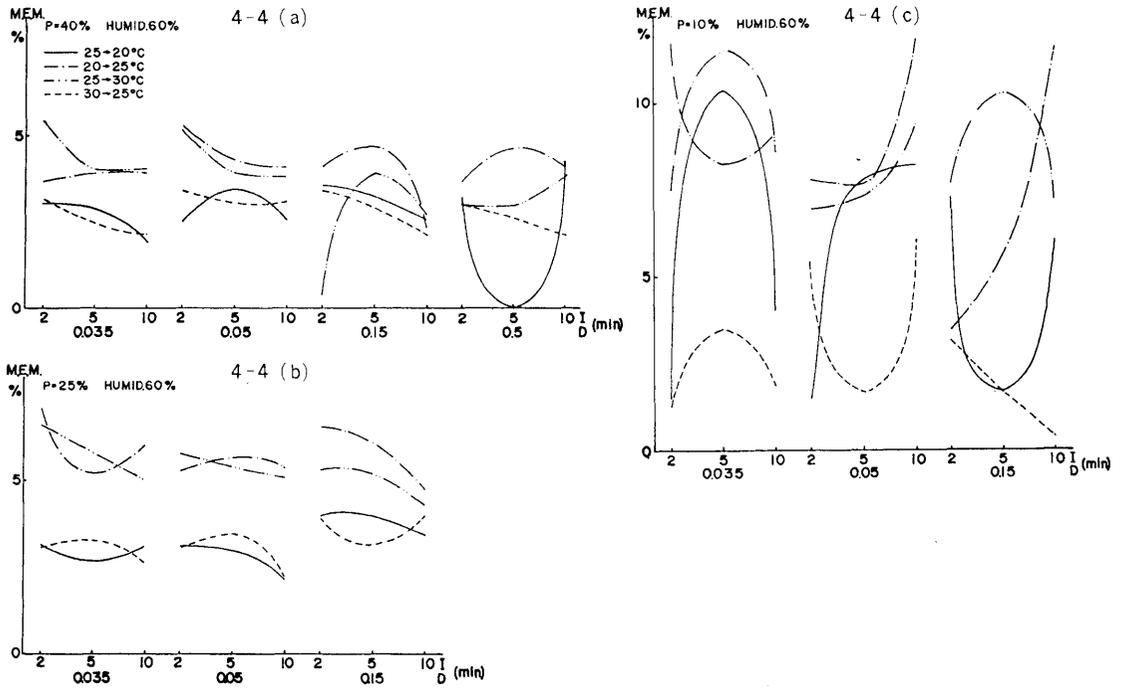


Fig. 4-4 Maximum humidity error magnitude upon variable parameter of temperature in different settings of temperature and humidity.

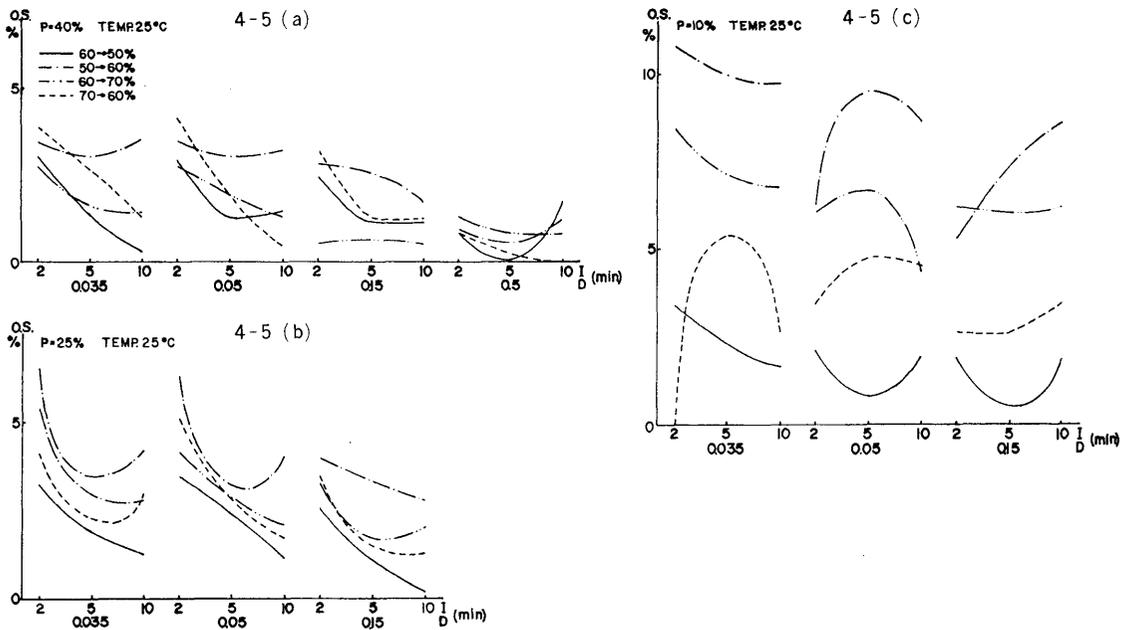


Fig. 4-5 Over shoot upon variable parameter of humidity in different settings of temperature and humidity P. I. D. controllers.

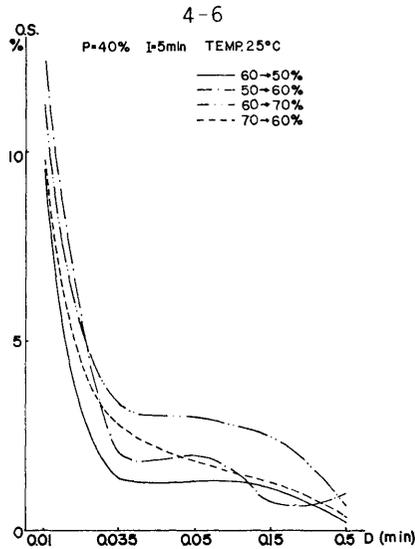


Fig. 4-6 Over shoot upon variable parameter of humidity in different settings of temperature and humidity P. I. D. controllers.

すなわち、温度時定数が大きい場合には、最大振幅が小さく、時定数が小さい場合には、その逆になる。このことは、制御量が温度の関数で表わされるフィードバック制御系において当然のことといえるが、計算機制御においては、目標値および外乱を予測したフィードフォワード・フィードバック系とすることにより、時定数が小さくしかも最大振幅およびオーバーシュートの少ない制御が可能となる。そして、この予測に際しても絶対湿度を制御変数とすることが、相対湿度そのままの値を用いるよりも有効であると考えられる。

Fig. 4-4 に、P. I. D. をパラメータとしたときの最大振幅を示し、Fig. 4-5 に、オーバーシュートを示す。これより比例感度  $P(\%)$  が大きいほどオーバーシュートが少ないことが分かる。また、Fig. 4-6 にみられるように、微分時間 ( $D=0.01\sim 0.5$  min) に関しては微分時間が大きいほどオーバーシュートは少ない。これは、オーバーシュートにおける微分の有効性を示すものである。また、積分時間  $I$  (min) の影響は、 $P=40, 25\%$  においてみられ、積分時間が小さいほどオーバーシュートは大きい。冷却能力の不足は、オーバーシュートを少なくする方へ働いている。最大振幅は、比例感度に大きく影響を受け、積分、微分時間がこの場合余り影響を与えないのは、系の積分性のためである。

## 結 び

グロースキャビネットの電算機制御システムを考える場合、プロセスに相当するグロースキャビネットの特性と、電算機とこのキャビネットを連結するインターフェイスの特性が、いわゆるハードとして重要であり、制御アルゴリズムのソフトと表裏一体をなしている。本報では、プロセスに相当するグロースキャビネットの制御に関する特性を、アナログバックアップで運転し、実測データから検討を行った。つづいてインターフェイスの問題、制御アルゴリズムの問題と、まず工学的基礎面を順次報告し、あわせて植物との関連も明らかにしていきたい。

最後に、この研究は昭和47年度文部省科学研究費補助金に依った。関係各位に厚くお礼申し上げる。

## 文 献

- 1) MATSUI, T. and H. EGUCHI. 1972. Regulation of plant growth and differentiation by automatic program control of environmental factors with the use of a computer. *Environ. Control in Biol.* **10**: 21-27.
- 2) MATSUI, T., H. EGUCHI, Y. HANAMI, S. HANADA, and T. TERAJIMA. 1971. A growth cabinet for the study on biotronics I. Design and performance. *Environ. Control in Biol.* **9**: 37-46.
- 3) MATSUI, T., H. EGUCHI, and K. TOH. 1973. Study on optimum PID controller settings for temperature control in a growth cabinet. *Environ. Control in Biol.* **11**: 31-35.

## Summary

Object of this studies is to investigate the fundamental characteristics of process control of biological growth by means of digital computer.

In this paper, for the first step, dynamic-characteristics of temperature and humidity control system in growth cabinet for D.D.C. (direct digital control) were discussed upon data obtained from operation by analog back-up system. As a result, characteristics of temperature and humidity control system (with the relations of temperature time constant, humidity time constant, desired value, input-signal and response-signal) were made clear quantitatively.

It can be concluded that dynamic-characteristics of temperature and humidity control system in this growth cabinet are sufficient for D.D.C.

(Received July 2, 1973)