

アダプティブコントロールによるグロースキャビネットの試作¹⁾

村田 忠*・田原康雄*・小西通夫**・
橋本 康***・大政謙次****

島津製作所航空機器事業部*

京都大学農学部**

愛媛大学農学部*** (現 国立公害研究所****)

人工環境下における植物生理の研究に必要なグロースキャビネットは、すでに多方面で使用されている。本研究では環境制御方法として電算機を導入し、制御精度の高い、かつ経済的なグロースキャビネットを設計目標として試作した。試作機について、植物材料の有無の条件下で温度、湿度および照度分布等を測定した。その結果、電算機によるアダプティブ制御の採用により温度・湿度の制御精度は向上し、温度は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内、相対湿度は $\pm 1\%$ 以内の高い性能が得られた。

1976年7月29日受付

1. ま え が き

最近、人工環境下における植物生産が急速な発展をみ、人工環境下における植物の挙動を生理学的に把握する必要性が日々増大している。そのため植物を人工環境下で試験する装置であるグロースキャビネットに対する要求も多方面にわたっている。すでに松井らにより高性能のアナログ制御方式によるグロースキャビネットの試作研究の報告¹⁾があり、またグロースキャビネットの中心をなす空調系の電算機によるデジタル制御方式については船田らの研究報告²⁾もある。しかしこれらの研究はグロースキャビネットの空調系冷凍機の常時運転による冷却ベース固定の方式である。筆者らは消費電力の節約の点から冷却ベースを固定しないチラー方式によるグロースキャビネットの試作を行った。さらに別の理由として、チラー方式を採用したのは冷凍機に負荷変動の影響を少なくし、冷凍機の信頼性を向上させることが可能と考えたためである。また制御精度を高めるため電算機制御方式によるアダプティブ制御を採用することにし

た。その結果の一部は既報³⁾に述べたが、ここにその詳細について報告する。

2. 試作グロースキャビネットの性能および構造

このような目標で試作したグロースキャビネットの主な性能、制御範囲および構成は Table 1 に示す通りであるが、とくに温度と相対湿度の制御範囲を Fig. 1 に示した。グロースキャビネットの構造は Fig. 2 に示されるように、ランプ室、試験室および地温制御室の3室から構成されている。ランプ室と試験室の間にはガラス水槽が設けられ、約 3 cm 水深の水を循環させることによりランプ室から試験室への熱伝達を防ぐとともに陽光ランプの赤外線を吸収させるようにしている。さらに水槽の下に必要なに応じて色フィルタを挿入しうる空間を設けている。試験室は Fig. 2 に示すように両側に空調制御室があり、空調された空気流は空調制御室上部のダンパー2カ所から試験室内に吹き出され下部の吸込口から空調制御室に吸い込まれる。空調制御室は循環用ファン、加湿ノズル、ヒータ、温度制御用クーラおよび脱湿用クーラ等で構成されている。試験室の温・湿度制御はヒータ、加湿器およびクーラに流れる冷水の流量制御で行われる。これらの操作信号は連続でなく断続量である。この信号方式は航空機の機内空調制御で広く採用されているオン・オフ制御の一種であるパルス幅変調方式を採用した。試験室は Fig. 2 の前面と後面に2重式の扉があり実験操作の便が計られている。地温は、試験室の下にある地温部水槽中に9個のポット(径 16 cm×高 17 cm)をつけ、水槽の温度を試験室と同様な方法で、試験室温

¹⁾ Tadashi MURATA,* Yasuo TAHARA,* Michio KONISHI,** Yasushi HASHIMOTO,*** and Kenji OMASA: Trial Production of a Growth Cabinet with Adaptive Control.

* Aircraft Equipment Division, Shimadzu Seisakusho Ltd., Kyoto.

** Faculty of Agriculture, Kyoto University, Kyoto.

*** Faculty of Agriculture, Ehime University, Matsuyama.

Table 1 Specification of growth cabinet.

Performance	Contents
Effective measurement in experimental room	(W) 1,000×(L) 1,000×(H) 1,000 mm
Temperature control	10~40°C±0.3°C
Humidity control	40~80% RH±3%, ref. Fig. 1
Illumination (1 m below lamp)	*30,000 lx (with program control)
Temperature program control	internalized
Humidity program control	internalized
Control system	computer control system
Cooling source equipment	Chilling unit
Number of units	(1) Cabinet
	(2) Measurement & control unit
	(3) Chilling unit
	(4) Cooling tower
Necessary amount of water	6 l/hour
Electric capacity	3 phases 200/220 V 50 or 60 Hz
	necessary power source 17 kVA
	average consumption 6 kVA
* Fine light adjustment is possible by up-and-down movement of sun-light lamp.	
Soil temperature control	soil temperature 7~40°C±1°C
	culture solution 7~40°C±1°C

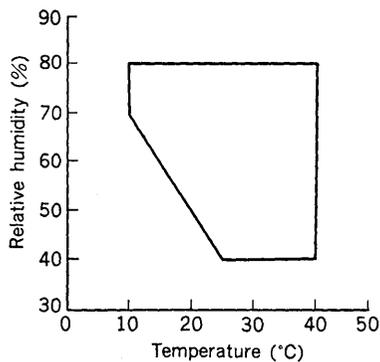


Fig. 1 Control range temperature and relative humidity.

度とは関係なく独立に制御される。また水槽中においた溶液タンク内の水耕液を定期的にポット内に灌水するようにしている。

チラー・ユニットは冷凍機および 300 l の冷水タンク

からなり、温・湿度制御用として 4~6°C の冷水を供給している。冷凍機はこの冷水温度を保つときだけ作動する。したがって従来の直膨方式に比較して周囲温度の変動による冷凍機の負荷変動が少なく、冷凍機作動の安定性は大幅に改善され、信頼性の向上が期待される。

電算機制御に用いる電算機は通常ミニコンピュータが多く使用されている。本試作では、コスト面の配慮から低価格のプログラマブルカリキュレータ (WANG 600) を採用し、プロセスとの結合には専用のインターフェイスを製作した。ミニコンピュータに比較して演算速度は 1~2 桁遅いが本試作のような空調制御系では特に問題はない。また部品信頼度の面から寿命が従来のアーマチュア・リレーより 1 桁以上大きい半導体のソリッド・ステート・リレー (SSR) を回路素子として多く用いた。なおランプ室では陽光ランプ (250 W) 9 個を取付け、タイマーによるプログラム・コントロールによりモータ駆動でランプを昇降させ照度の制御を行うようにしている。

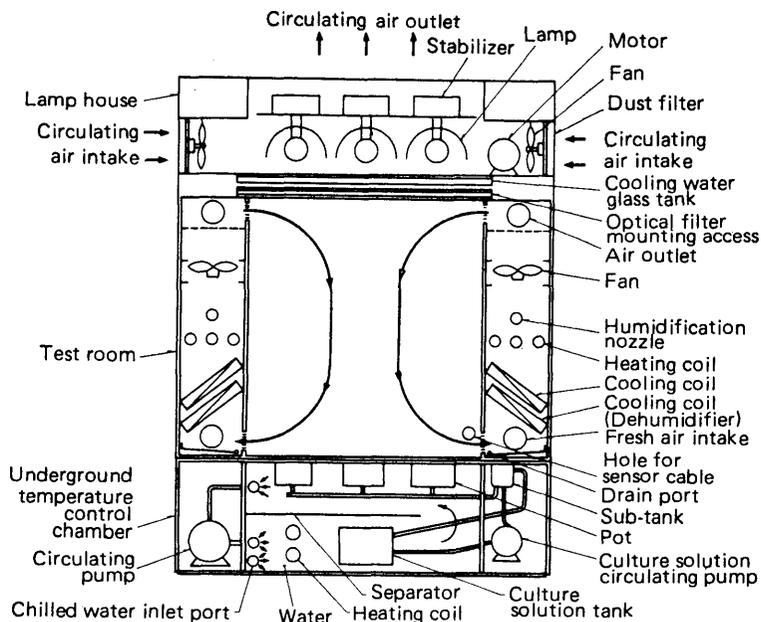


Fig. 2 Sectional view of growth cabinet.

3. プロセス制御系

プロセス制御系の全系統図を Fig. 3 に示す。電流変換された各検出端の信号は電算機を含むプロセス・コントロール・ユニット (PCU) に伝送され、後述する制御アルゴリズムにより演算され、結果として操作信号がパルス幅変調方式で操作端に伝達される。パルス幅変調信

号はオン・オフ信号形式で操作量が 0% のとき連続オフ信号となり、操作量が 100% のとき連続オン信号となる。またそれらの中間値のとき操作量 $\% = T/T_0$ となる (T はオンの時間, T_0 はパルス周期時間)。この操作信号によりヒータの場合は SCR を用いたソリッド・ステート・リレー (SSR) によりパワーが制御され、チラー・ユニット (CU) の冷水および加湿器 (SG) の蒸気は電磁

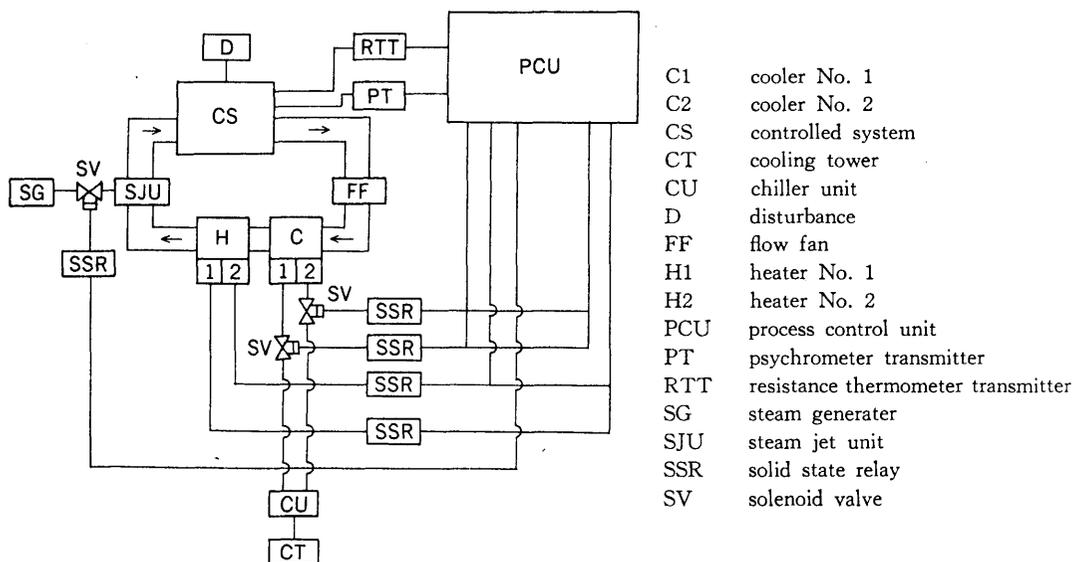


Fig. 3 Block diagram of temperature and humidity control system.

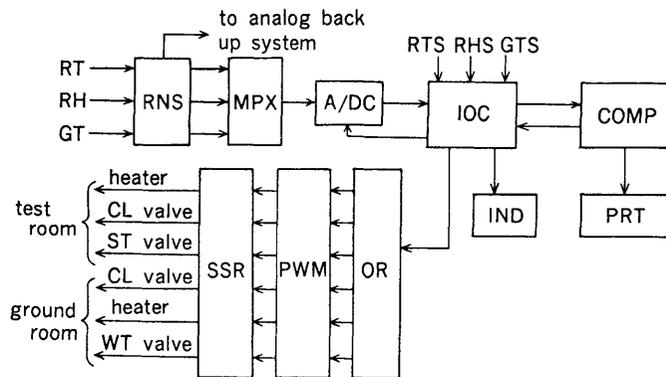


Fig. 4 Schematic diagram of process control unit.

A/DC	analog to digital converter	RH	room humidity sensor
CL	cooler	RHS	room humidity setting
GT	ground temperature sensor	RNS	resistance network and selector
GTS	ground temperature setting	RT	room temperature sensor
IND	indicator	RTS	room temperature setting
IOC	input/output control circuit	SSR	solid state relay
MPX	multiplexer	ST	steam
OR	output registers	WT	water
PRT	printer	COMP	computer
PWM	pulse width modulation		

弁 (SV) により流量がそれぞれ制御される。

冷熱源である冷水温度はチラー・ユニット内で独立に制御され、4~6°C に保持されている。一方、加湿源である蒸気は蒸気タンクにより供給されるが、この制御もシステムのプロセス・コントロールとは無関係に蒸気タンク内で独立に制御されている。

Fig. 3 中のプロセス・コントロール・ユニット (PCU) の詳細説明図は Fig. 4 の通りである。プロセスの温度および湿度は 4~20 mA の電流信号の形でプロセス・コントロール・ユニット (PCU) の抵抗回路網 (RNS) に入る。これはアナログ・バックアップ・システムへの切換回路と抵抗回路網であり、ここで電流信号は 0.2~1 V の電圧信号に変換される。この電圧信号はアナログ・マルチプレクサ (MPX) に入り、電算機の指令によって必要な信号が選択されアナログ・デジタル変換器 (A/DC) に送られ、そこでデジタル信号に変換される。この変換器はフルスケールが 1.999 V のデジタル・パネルメータを使用しているが、その出力は 2 進化 10 進コードで表わされ、入出力制御回路 (IOC) を通じて電算機 (COMP) に入る。一方、設定信号は試験室の温度 (RTS)、湿度 (RHS) および地下温度 (GTS) である。これらの信号は 4 桁のデジタル・スイッチで 2 進化 10 進コードとなり電算機 (COMP) に入る。演算結果は 30 秒に 1 回プリンタ (PRT) により印字され、また同時に表示

器 (IND) に示されるとともに、操作量は出力レジスタ群 (OR) に伝送される。この操作量出力はパルス幅変調回路 (PWM) によってオン・オフ信号に変換されソリッド・ステート・リレー (SSR) を通じてヒータおよびバルブを操作する。このように本試作のプロセス・コントロール・ユニット (PCU) においてアナログ・デジタル変換器 (A/DC) 以降はすべてデジタル信号で処理され、デジタル・アナログ変換器は使用されていない。

4. 制御アルゴリズム

制御プログラムのフロー・チャートを Fig. 5 に示す。まずアナログ入力を読み込むが、温度の場合は 0~50°C を 0.200~1.000 V に、湿度の場合は 0~100% を 0.200~1.000 V の入力信号にそれぞれ変える。これらの関係を式 (1) および (2) に示す。

$$T_i = 62.5(E - 0.2) \quad (1)$$

$$H_i = 125(E - 0.2) \quad (2)$$

ここに T_i : 温度 (°C), H_i : 湿度 (% RH)

E : 入力電圧 (V)

この温度・湿度の値を 10 回読み込み、その平均値をとって 1 サンプル時のプロセス温度・湿度とし、表示器に現在のプロセス状態を表示するとともに、この値を制御演算に用いる。本試作では、この入力読み込み、平均値演算を含めたサンプリング周期は制御系の時定数およ

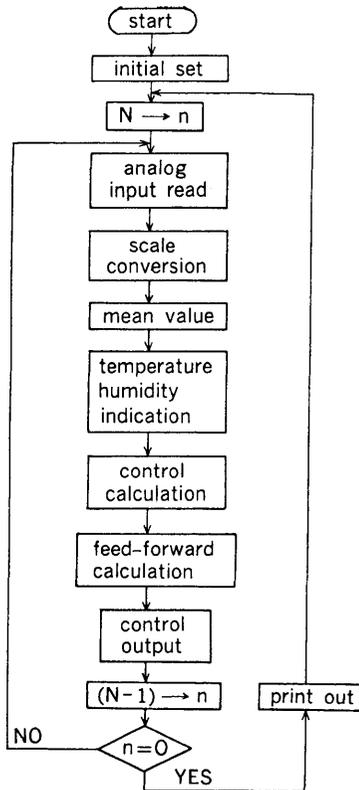


Fig. 5 Flow chart of control program.

びむだ時間を考慮して7.5秒とした。

次に、デジタル設定器により3桁の設定値を読み込み、現在（実測）値と比較して偏差を算出する。温度については物理量のままで演算を行うが、湿度については現在の % RH をその時の温度における絶対湿度に変換し、さらに設定値についても同様に絶対湿度に変換して両者の差を偏差信号として制御演算を行った。制御アルゴリズムは PI 制御を用い、式 (3) にその原理的な計算式を示す。

$$U_i(\text{または } U_h) = K \left(e_n + \sum \frac{\tau}{T_i} \cdot e_n \right) \quad (3)$$

ここに

U_i : 温度計算操作量 e_n : 偏差信号
 U_h : 湿度計算操作量 τ : サンプル周期
 K : 比例ゲイン T_i : 積分時間

計算操作量 U_i (または U_h) は -99.9% と 99.9% の間の数値をとる。比例ゲイン K は加熱側および冷却側で異なり、それぞれ設定値、外気条件などの関数で表わされるが一般的には式 (4) の形となる。

$$\left. \begin{aligned} K_{th} &= f_1(T_0) \\ K_{lc} &= f_2(T_0) \\ K_{hd} &= f_3(T_0, H_0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに

K_{th} : 加熱ゲイン T_0 : 設定温度
 K_{lc} : 冷却ゲイン H_0 : 設定湿度
 K_{hd} : 脱湿ゲイン

なお加湿量は外気の絶対湿度を求め、設定湿度との関係から必要な加湿量を計算し、一定量を制御系に加え最終的な制御は脱湿動作で行った。積分時間 T_i は温度系 360 秒、湿度系 180 秒としたが、これらの数値はプロセスの時定数およびむだ時間を考慮して求めた。なお温度計算操作量 U_i には脱湿操作時に生じる温度変化を防ぐ目的のため一部修正計算を行った。プロセスの温・湿度および操作量はプリンタ (PRT) で印字されるが、以下の実験では印字時間間隔を 30 秒とした。なお制御に使用した電算機およびインターフェイスの写真を Fig. 6 に示す。

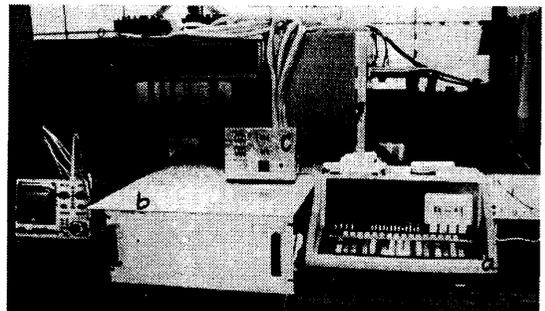


Fig. 6 General view of computer and interface units.

a : computer (WANG 600)
 b : interface
 c : indicator panel

5. 制御の結果および環境測定

(1) 制御の結果

本試作品について、試験室の制御精度を植物を入れた場合と入れない場合で測定した。この実験では植物として8個のポット (径 16 cm) に1本ずつ植えた草丈約 40 cm のトマト「ずいこう」 (*Lycopersium esculentum* cv. Zuiko) を用いた (Fig. 7 参照)。なお温度センサーとして 0°C 100 Ω の白金抵抗体を金属管に入れたものを使用し、湿度センサーとしてファンにより風速補正を行った乾・湿用の白金抵抗体 (千野製作所, モデル R021-10) を用いた。各センサーは試験室の中央位置に取付けられて計測が行われた (Fig. 7 参照)。

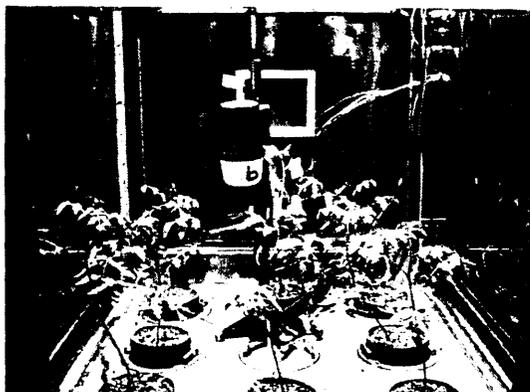


Fig. 7 General view of test room with plants.

- a: temperature sensor
- b: relative humidity sensor

(A) 定常特性

植物を試験室に入れ、ライト消灯状態で30°C, 60% RHの定常特性試験を行った。この試験において温度操作量(加熱)は23%付近、湿度操作量(除湿)は-5%付近でベースがごくわずかフロートした。

植物を入れ、ライト点灯状態で30°C, 60% RHの定常特性試験において、電算機でプリントアウトされた温・湿度および温・湿度操作量を Fig. 8 (A) に示した。温度操作量(加熱)は20%、湿度操作量(除湿)は-7%でベースが少しフロートしている。これらのわずかのフロートは60 m³/hrの新鮮空気を試験室に取り入れたための外乱によるものと思われる。なお植物を入れない状態でもほぼ同様なデータが得られた。

(B) 過渡特性

試験室を30°C, 55% RHの状態から、相対湿度のみ

1時間で65%に変え、1時間保持後再び55%の状態に1時間で変化させる過渡特性試験を行った。

植物を試験室に入れ、ライト消灯時の過渡特性試験において、温度操作量(加熱)は17%~30%、湿度操作量(除湿)は-2%~-11%でそれぞれベースがフロートした。

ライト点灯時の過渡特性試験において、電算機でプリントアウトされた温・湿度および温・湿度操作量を Fig. 8 (B) に示した。温度操作量(加熱)は14%~28%、湿度操作量(除湿)は-3%~-15%でそれぞれベースがフロートしている。このデータでライト消灯時に比較してライト点灯時の湿度操作量(除湿)が増大しているが、このことはライト点灯時に植物の蒸散が増加したために生じたものと思われる。

(2) 照度および風測定

試験室の照度を東芝製 SPI-5 を用いて測定し、その結果を Table 2 に示した。照度測定は、室内平面の中央と側壁から10 cm内側で各辺の両隅と中央の計9カ所について、床面から10 cm(光源から105 cm, 145 cm), 50 cm(光源から65 cm, 105 cm)の位置で行われた。なお Table 2 の測定場所1~3は室後部、4~6は室中間部、7~9は室前部の位置で、それぞれ左隅から右隅へ順に番号が付けられている。これらの照度測定結果から次のような知見が得られた;

- A) 試験室の後部中央位置が最も高い照度となっている。
- B) 測定部の照度分布のバラツキは、光源ランプからの距離が遠くなる程少なくなっている。
- C) 試験室の4隅では、光源からの距離の遠いものに近いものに比較して照度が大きくなっている場合があ

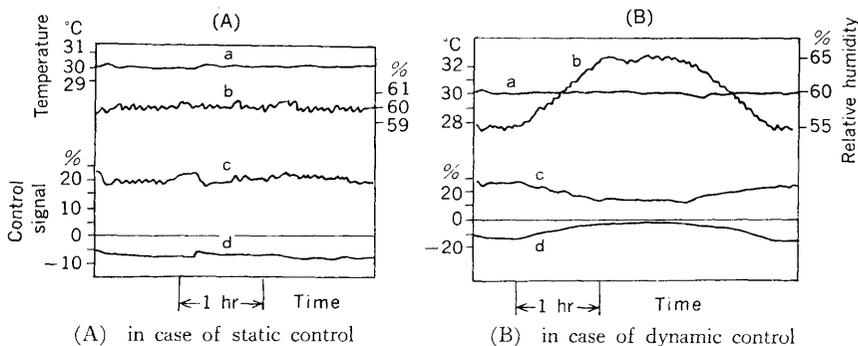


Fig. 8 Data of computer control.

- a: air temperature (°C)
- b: relative humidity (%)
- c: temperature control signal (%)
- d: humidity control signal (%)

Table 2 Light distribution (klux).

Lamp height (mm)	Measuring height (mm)	Measuring places								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,150	100	23.8	27.1	20.2	25.0	26.8	23.6	18.9	25.0	20.0
	500	22.3	37.0	22.0	27.0	35.0	27.7	20.2	31.7	23.4
1,550	100	17.4	18.2	15.4	16.3	15.7	14.3	15.5	18.2	16.2
	500	15.0	19.9	14.8	16.8	19.5	15.4	13.2	17.4	14.4

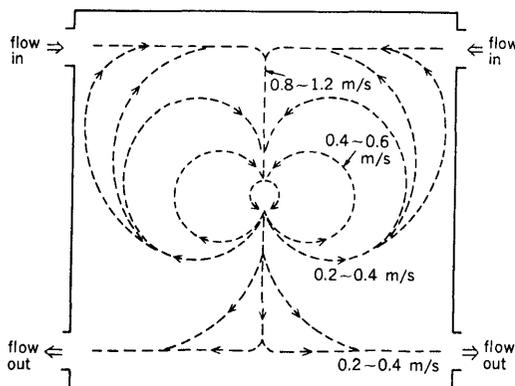


Fig. 9 Air flow in growth cabinet.

る。これはランプの傘およびステンレス板の壁面からの反射等による影響と思われる。

風向は線香の煙、風速はアネモメータ（日本科学工業、モデル 24-3111）によりそれぞれ測定され、その結果を Fig. 9 に示した。試験室の構造は、空気が上部 2 カ所吹出し、下部 2 カ所吸込みとなっているため、図に見られるように室内では乱流が生じている。

これら制御特性の実験結果から次のことが推定できる；チラー・ユニットを採用したアダプティブ制御は、同様な構造のグロースキャビネットの場合、従来タイプのものより精度の高い制御が可能である。またグロースキャビネットの室内照度分布については、壁面およびランプの傘等の反射による影響がきわめて大きい。

6. あとがき

パルス幅変調の操作信号方式で安価な電算機を用い、チラー方式による冷却を採用した試作グロースキャビネット

において、各種試験の結果、測定場所付近で温度は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内、相対湿度は $\pm 1\%$ 以内で制御しうることが判明した。この種のものとしては制御精度は大幅に向上したと思われる。

本研究を進めるにあたり有益な助言ならびに計測に参加して頂いた文部省特定研究「生物生産プロセス」計測班の方々に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 松井 健・江口弘美・花見至晃・半田 繁・寺島貞二郎, 1971. 高性能グロースキャビネットの試作 I. 生物環境調節 **9**: 37-46.
- 2) 船田 周・橋本 康・大政謙次・安保文彰・福屋章博, 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**: 117-121.
- 3) 村田 忠・田原康雄・小西通夫・橋本 康・大政謙次, 1975. アダプティブコントロールによるグロースキャビネットの試作. 生物環境調節第 13 回要旨.

Summary

The growth cabinet is widely in use today as a research tool for studying the growth and physiological processes of plants under controlled environment. The new design incorporates an adaptive control system in regard to environmental control using a low cost computer. An experimentation with a prototype production model has yielded the following positive result after performance test with or without plant materials, namely, enhanced control accuracy through the use of adaptive control method with computer; temperature to within $\pm 0.2^\circ\text{C}$ and relative humidity to within $\pm 1\%$.

(Received July 29, 1976)