

ファイトトロンにおける制御系のアナログシミュレーション (III)¹⁾

温湿度制御系の動特性について

船田 周*・橋本 康*・大政謙次*

愛媛大学農学部*

アナログシミュレーションにより、ファイトトロンの温湿度制御系の動特性を水めた。温度、湿度は独立な二変数制御系ではなく、温度系の動特性ならびに加湿、減湿の動特性をもとに複雑な現象を呈する。この二変数制御系をシミュレーションによって検討し、その動特性が一部明確になった。

昭和47年10月2日受付

1. ま え が き

ファイトトロンの実測にもとづくアナログシミュレーションについて、温度制御系の定性的動特性と加湿、減湿の動特性²⁾、温度制御系の定量的動特性とその設計面への応用²⁾をすでに報告した。

本論文では、以上のシミュレーションでえられた温度ならびに湿度に関する基礎にもとづき温湿度二変数制御系の動特性をとりあげる。ファイトトロンはもちろんのこと、空調工学分野においても、温湿度二変数系についての動特性は、その重要性にもかかわらずほとんどみられない。それゆえ、頼みとする文献もなく、すり足で歩む現状である。シミュレーションは現在なお続行中であるが、温湿度二変数系の定性的な特性についてはほぼえられた。定量的特性は今後の課題とし、主として定性的特性につき報告する。

2. システムの概要とシミュレーションにおける設定条件

ファイトトロンにおいて、温湿度は操作部内で Fig. 1 に示すような相互干渉をなす。ここで、 t_i, x_j はそれぞれ、各状態の温度および絶対湿度を表わす。制御対象で

ある部屋から循環してきた空気は、外部から取り入れた新鮮空気と混合され冷却部に送られる。冷却は、非線形要素を持つ3位置オンオフ動作であり、同時に除湿もなす。冷却部を通過した空気は、2位置オンオフ動作で制御される加湿スプレーを通り、PI動作で制御される加湿ヒータへと送られる。以上が制御操作部の概略であり、これらを検出部と一括して制御装置とする。ファイトトロンは、この制御装置と、植物を置く部屋、すなわち制御対象によって構成されるものであり、Fig. 2 に示すようなブロックダイアグラムで近似できる。ここで、湿度伝達関数は絶対湿度に注目して表わしたものであり、温

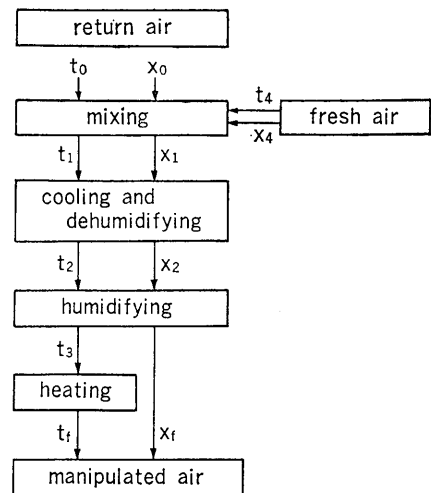


Fig. 1 Mutual interference of temperature and humidity in final control element.

t_i ; temperature
 x_j ; absolute humidity

¹⁾ Shu FUNADA, Yasushi HASHIMOTO, and Kenji OMASA*: On the Analog Simulation of Control System of Phytotron. (III)

Dynamic Characteristic of Temperature and Humidity Control System.

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

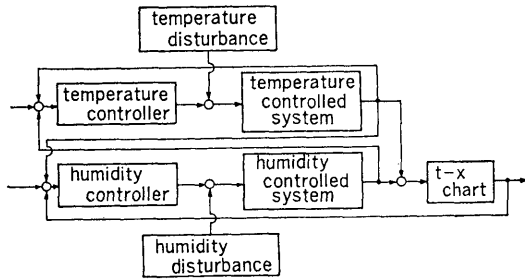


Fig. 2 Block diagram of temperature and humidity control system.

度伝達関数さらには、絶対→相対湿度変換系とあいまって、一つの相互干渉温度プロセスを構成する。絶対→相対湿度変換系は、 $t-x$ chart より得られるものであり、温度と絶対湿度が与えられれば次式の関係より、相対湿度が算出される。

$$\varphi = \frac{1}{h(t)} \cdot \frac{Hx}{\rho + x}$$

ただし、 $h(t)$: $t^{\circ}\text{C}$ における飽和蒸気圧, mmHg

ρ : 定数, 0.622

H : 湿り空気的全圧, mmHg

φ : 相対湿度, %

x : 絶対湿度, kg/kg

このプロセスをアナコンにシミュレートするパッチプログラムを Fig. 3 に示す。操作部の加温 PI, 加湿オンオフ, および冷却減湿の冷却器の 3 位置オンオフには不感帯を持たせ、温湿度時定数はそれぞれ独立に、むだ時間を持った一次遅れで近似する。実際問題としてわれわれがシステムの伝達関数を知る場合、調節操作部と制御対象との特性が複合された状態のものである。すなわち、加温コイルや冷却コイルでの熱交換特性と、部屋での熱拡散の特性は分離しにくい。この意味で、加湿および除湿の場合も同様である。したがって、制御対象は、加温冷却、加湿除湿はそれぞれ同じ伝達関数と考えられながらも、加温コイル、冷却除湿コイル、加湿スプレーにおける伝達関数は一般に異なるため、観測できる伝達関数もまた異なる。また設定温度と外気温度とが異なる場合これを外乱と考えず制御対象固有の性質として考える場合は、やはり制御対象の伝達関数は、加温冷却で異なってくる。外乱は一意的には決定できないが、新鮮空気取入れや壁面からの熱伝導、日射の輻射熱などが考えられ、温湿度の外乱がそれぞれ Pot. 12, 13 によって任意に設定できるようになっている。操作部の能力を含むこれらのパワーは、温度においては cal 単位を室温変化すなわち $^{\circ}\text{C}$ 単位に換算した値を、また、湿度は ($\times 10^{-3}$ kg/kg) 単位の絶対湿度で与える。

初期値は、Pot. 18, 19 によって温度 ($^{\circ}\text{C}$), 湿度 ($\times 10^{-3}$ kg/kg) を与えるが、それのみでは制御対象の初期値としては作用しないので、Pot. 22 で相対湿度に換算したバイアスかける。このシステムにおいて、目標値は温度あるいは相対湿度であるが、その際検出される偏差の相対湿度と、操作段階での測定である絶対湿度との対応をつかさどる役目を果たす。ここでは、 10°C , 20°C , 30°C の相対湿度 50% を基準にとり、それぞれ $k_{hx} = 0.75, 1.375, 2.75$ (kg/kg % $\times 10^{-3}$) で与える。評価は、単位時間当りの偏差の絶対値積分 (I. A. E./min) で行なう。このとき、制御変数が温度と相対湿度であることから、(I. A. E./min) の単位はそれぞれ $^{\circ}\text{C}$, % となる。

以上がパッチプログラムの概要であるが、具体的には次のようにセットする。操作部の冷却除湿機はそれぞれ、1 台目 0.25°C , 0.05×10^{-3} kg/kg, 2 台目 0.55°C , 0.11×10^{-3} kg/kg の不感帯幅を有し、能力は、1 台当り、室温を 4.5°C 下げ 4.5×10^{-3} kg/kg の除湿を行なう。加湿機は 0.05×10^{-3} kg/kg の不感帯を持ち、 9×10^{-3} kg/kg の加湿能力を有する。加温機は、 0.25°C の不感帯を持ち、比例感度 $P=20\%$ 、積分時間 $I=\infty$ min とする。このときの比例感度および積分時間とは、PI 動作すなわち $m = K_P \left(e + \frac{1}{T_I} \int e dt \right)$ (ただし、 m は操作部出力、 e は操作部入力を表わす) での $P=1/K_P \times 100$ (%), $I=T_I(\text{min})$ である。温度操作部での能力を室温変化 ($^{\circ}\text{C}$) で規定することは、 $t-x$ chart でみられるように相対湿度との関連から、各状態において操作能力の変動をもたらすが、その値は $t-x$ chart から読み取れるので、各状態を混同しさえしなければ、結果の解析には支障をきたさない。逆に、状態の遷移に伴う不必要な能力不足現象をおさえ、干渉等の制御特性をみるにはよいという利点を持つ。

他に、温度時定数: T_t , 温度むだ時間: L_t , 湿度時定数: T_h , 湿度むだ時間: L_h , 温度初期条件: t_i , 湿度初期条件: h_i , 制御対象と操作部との間の絶対→相対湿度変換数: k_{hx} 等の設定条件が必要であるが、これは、そのつど記すことにする。

各実験での制御入力信号は、温度が $\pm 2.5^{\circ}\text{C}/10$ sec, $\pm 5^{\circ}\text{C}/20$ sec, 湿度が $\pm 10\%/10$ sec, $\pm 20\%/20$ sec, のプログラム制御を導くものとする。なお、実際のプロセスでの経過時間は、その 1 min をアナコンの電子演算での経過時間の 1 sec への時間変換を行なっている。すなわち、タイムスケールとして、実際のプロセス 1 min \leftrightarrow アナコンでの 1 sec の対応関係とした。また、制御変数とアナコンとのスケールファクタは、 $1^{\circ}\text{C}=2$ V, 1×10^{-3} kg/kg = 1 V, $1\% = 1$ V, 1 mmHg = 1 V とした。

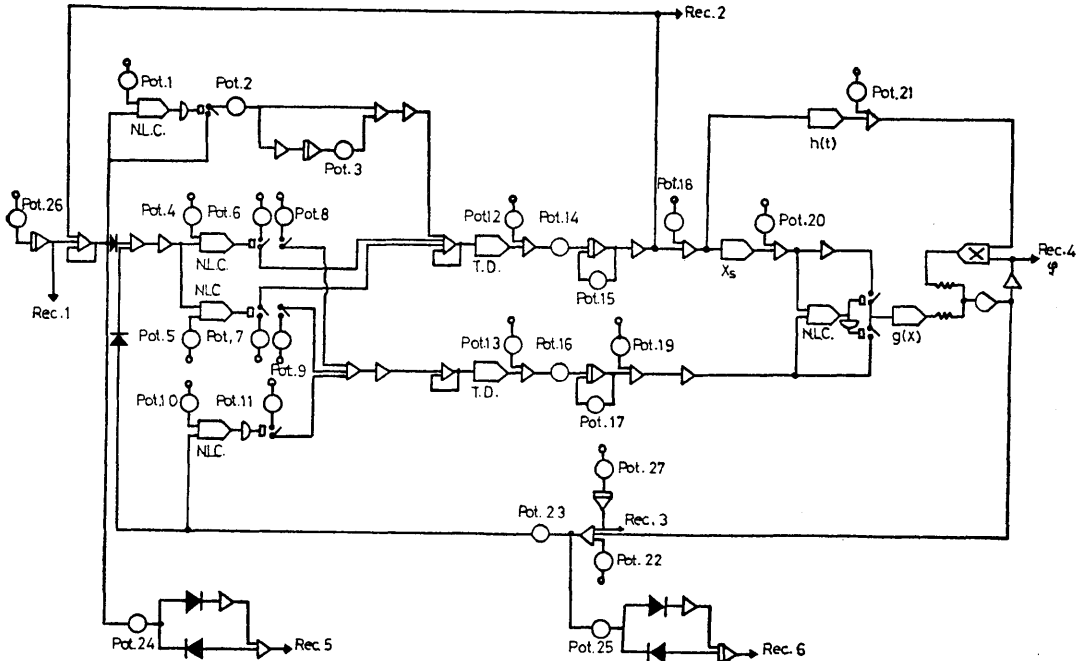


Fig. 3 Computer setup for temperature and humidity control system.

No.	Setup-potentiometer
Pot. 1	dead zone of heating
2	proportional sensitivity of heating P.I. controller
3	integral time of heating P.I. controller
4, 5	dead zone of cooling and dehumidifying
6, 7	power of cooling on-off controller
8, 9	power of dehumidifying on-off controller
10	dead zone of humidifying
11	power of humidifying on-off controller
12	temperature disturbance
13	humidity disturbance
14, 15	time constant of temperature system (first order lag)
16, 17	time constant of humidity system (first order lag)
18	initial condition of temperature system
19	initial condition of humidity system
20, 21	bias of $t-x$ chart
22	bias which sets initial condition of humidity system
23	coefficient of relative to absolute humidity converter
24, 25	coefficient of I. A. E.
26	input of temperature
27	input of humidity

3. 外乱の変化に伴う動特性

制御装置は、先に記した設定条件のごとく、また制御対象は、 $T_i=20$ min, $L_i=1$ min, $T_h=20$ min, $L_h=1$ min, $t_i=20^\circ\text{C}$, $h_i=50\%$, $k_{hx}=1.375$ (20°C) に固定し、外乱および目標値を変えて、その動特性を調べる。アナコンから直接得られる結果の一例を Fig. 4 に示す。上

から、温度目標値、温度出力、湿度目標値、湿度出力、温度評価、湿度評価の順である。外乱は温度外乱、湿度外乱を ($D_t^\circ\text{C}$, $D_h \times 10^{-3}$ kg/kg) で表わすと、(0, 0), (± 2.5 , 0), (± 5 , 0), (0, ± 2.5), (0, ± 5) の9通りにとり、それぞれに $\pm 5^\circ\text{C}$, $\pm 2.5^\circ\text{C}$, $\pm 20\%$, $\pm 10\%$ の目標値を与えた。それゆえ計 $9 \times 8 = 72$ 通りのデータを得る。そして、これらを系統的にまとめたのが、Fig. 5~8

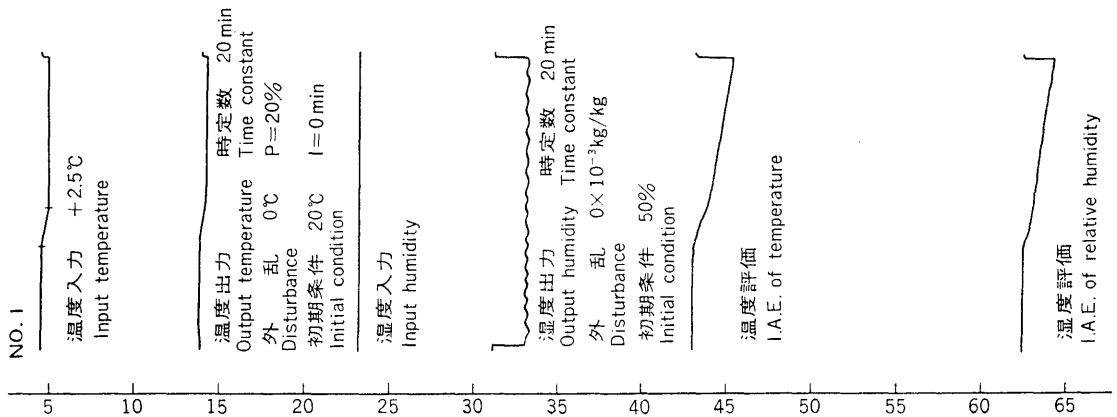


Fig. 4 Analog simulation-chart of temperature and humidity control system.

である。すなわち、Fig. 5 が温度外乱と温度目標値、Fig. 6 が湿度外乱と湿度目標値、Fig. 7 が湿度外乱と温度目標値、そして Fig. 8 が湿度外乱と湿度目標値が加わったときの I. A. E. 評価との関係を表わしたものである。横軸には外乱、縦軸には、(a) が温度評価 ($^{\circ}\text{C}$)、(b) が湿度評価 (%) をとってある。これらのグラフから過去において得た操作部の比例動作、あるいはオンオフ動作の特徴を如実に捉えることができる。すなわち、Fig. 5 (a)、Fig. 6 (a)、Fig. 7 (a) の負の温度外乱、あるいは正の湿度目標値の場合、すなわち PI 加湿機が動作するときに、比例動作によるオフセットの影響が出ている。オンオフ動作の方は、冷却除湿部の干渉による影響に打ち消されてあまり顕著ではないが、Fig. 7 (b) の負の湿度外乱、正の湿度目標値に対する加湿能力、あるいは Fig. 8 (b) の正の湿度外乱に対する除湿能力、負の湿度外乱に対する加湿能力のような、オンオフ制御の能力に起因する形で表われている。この種の能力は、不足すると困るが、あまり大きくすると定常状態でのハンチングによって I. A. E. が増大するので、各状態に応じて決めなければならない。また、このシステムの特徴である冷却除湿機内の影響は、各状態において明らかにみられる。その一つのパターンは、Fig. 5、8 のような目標値と外乱が同じ制御変数に対するものである。これを Fig. 5 に例をとって説明すると、まず正の温度外乱に対してはそれを初期状態に安定させるために冷却機が動作する。しかし同時に除湿もされるため、加湿機が入り、初期状態においてもハンチングが生じる。さらに負の湿度目標値を与えれば、先の冷却除湿および加湿機がそれに追従するように動作し、新しい定常状態を作る。しかしこのとき、冷却、除湿が相互に干渉しているため、その追従性が遅くなり、I. A. E. 評価は必然的に悪くなる。総じて、

第1のパターンの干渉は、大なり小なり上記の理由によるものである。第2のパターンは、Fig. 6、7 にみられるように、目標値と外乱の制御変数が違う場合、すなわち湿度目標値に対しては湿度外乱、湿度目標値に対しては温度外乱が加わったときに対するものである。これを Fig. 6 に例を取って説明すると、正の温度外乱に対しては、Fig. 5 の場合と同様初期状態においても、冷却除湿および加湿が動作している。これに正の湿度目標値を与えると、除湿しながら加湿しなければならないので、目標値に対する追従性が遅く、I. A. E. 評価が悪くなることは当然といえる。このパターンの干渉は、大なり小なり上記の理由によるものである。以上の結果、外乱および目標値の変化に伴う動特性の実体が見きわめられた。

4. 温度あるいは湿度時定数の変化に伴う動特性

制御装置は、先に記した設定条件のごとく、また制御対象は、 $L_t=1\text{ min}$ 、 $L_h=1\text{ min}$ 、 $t_i=20^{\circ}\text{C}$ 、 $h_i=50\%$ 、 $k_{hx}=1.375 (20^{\circ}\text{C})$ 、外乱は温湿度ともなし、に固定し、温度あるいは湿度時定数を変えて、目標値に対する動特性を調べる。ここで、温度時定数 $T_{t\text{ min}}$ 、湿度時定数 $T_{h\text{ min}}$ であることを、 $T(T_t, T_h)$ と表わし、 $T(5, 5)$ 、 $T(5, 10)$ 、 $T(5, 20)$ 、 $T(10, 5)$ 、 $T(10, 10)$ 、 $T(10, 20)$ 、 $T(20, 5)$ 、 $T(20, 10)$ 、 $T(20, 20)$ の9通りの時定数の組み合わせを作り、それぞれに $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ の目標値を与えた。それゆえ、計 $9 \times 8 = 72$ 通りのデータを得る。そして、これらをまとめたのが Fig. 9~11 である。すなわち、Fig. 9 が温度目標値、Fig. 10 が湿度目標値を与えたときの I. A. E. 評価との関係を表わしたものである。横軸に目標値、縦軸には (a) が温度、(b) が湿度評価をとってある。このグラフを各時定数別に大小関係で表わしたのが Table 1 である。これから、

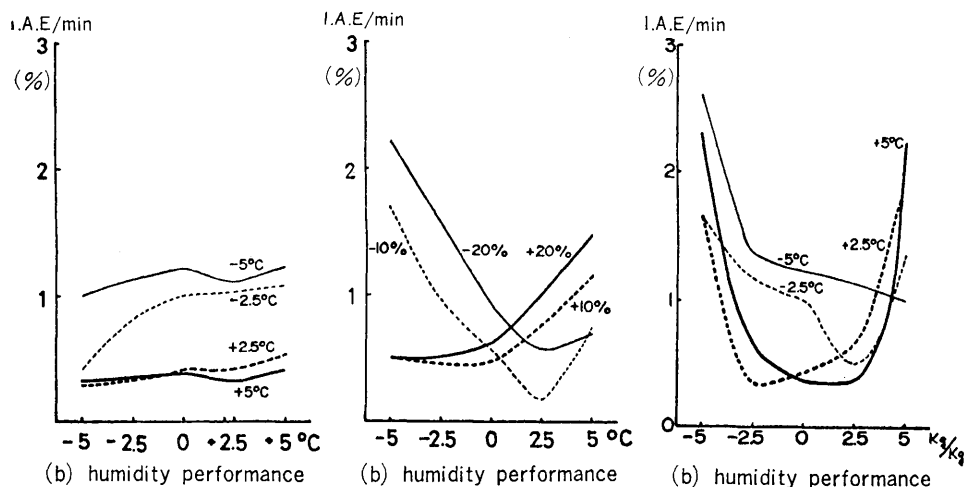
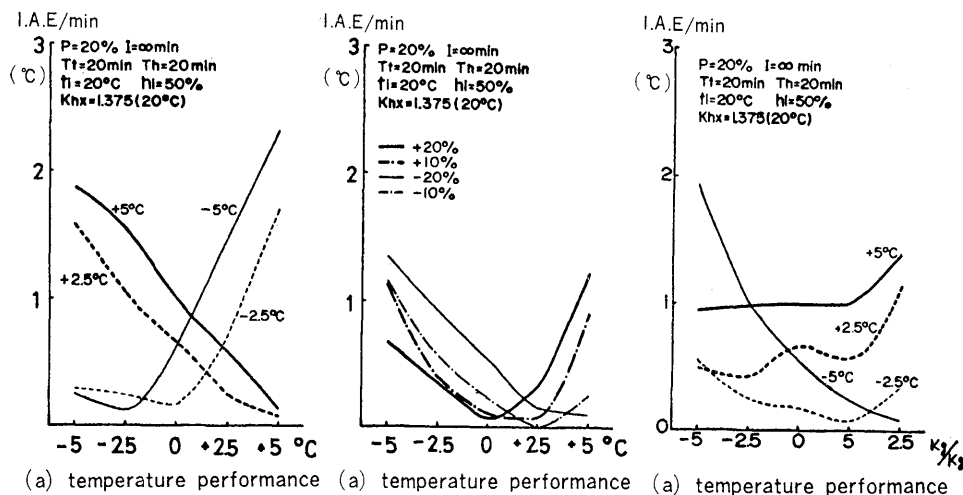


Fig. 5

Fig. 6

Fig. 7

Fig. 5 Performance of temperature or humidity output against temperature desired value owing to change of temperature disturbance.

Fig. 6 Performance of temperature or humidity output against humidity desired value owing to change of temperature disturbance.

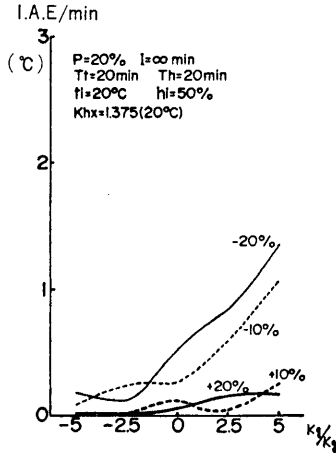
Fig. 7 Performance of temperature or humidity output against temperature desired value owing to change of humidity disturbance.

温度時定数を固定した場合は、湿度時定数が 20, 10, 5 min の順に I. A. E. 評価が温度、湿度とも悪くなるのがわかる。すなわち、温度の時定数が決まれば、湿度時定数は大きいほどよい。次に湿度時定数を固定すれば、温度時定数固定の場合と多少趣きを異にする。すなわち、湿度時定数が、10 ないし 20 min のときは、温度時定数が 10, 20, 5 の順に I. A. E. 評価は温度、湿度とも悪くなるが、湿度時定数が 5 min になると、温度評価は 10, 5 or 20 min の順に、また湿度評価は 5, 10, 20 min

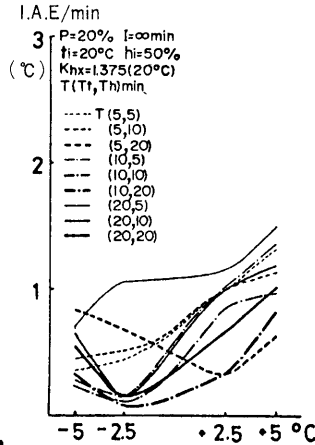
の順に悪くなる。これは湿度応答が比較的遅い (20 min, 10 min) システムでは、温度時定数 10 min 前後が有効であることを示している。しかし、速い (5 min) システムではこのことは一概には決定できない。

5. 温度あるいは湿度初期値の変化に伴い、操作量を変化させたときの動特性

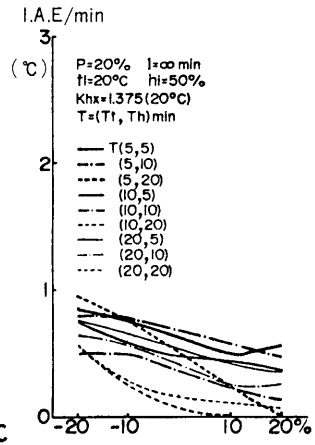
制御装置は、先に記した設定条件のごとく、また制御対象は、 $T_l = 20 \text{ min}$, $L_l = 1 \text{ min}$, $T_h = 20 \text{ min}$, $L_h = 1$



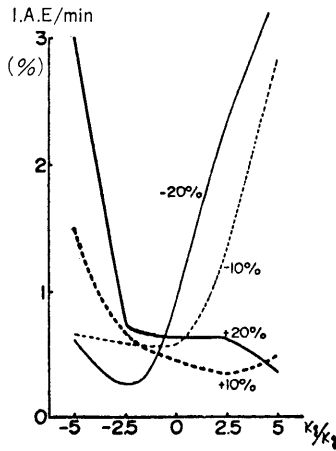
(a) temperature performance



(a) temperature performance

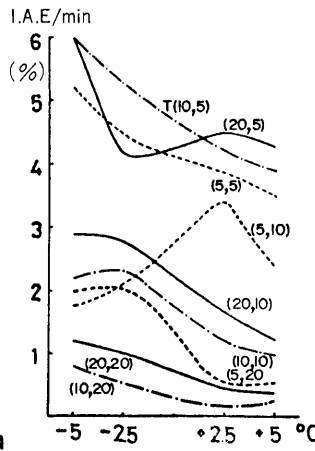


(a) temperature performance



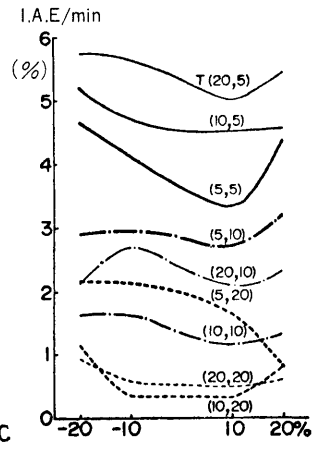
(b) humidity performance

Fig. 8



(b) humidity performance

Fig. 9



(b) humidity performance

Fig. 10

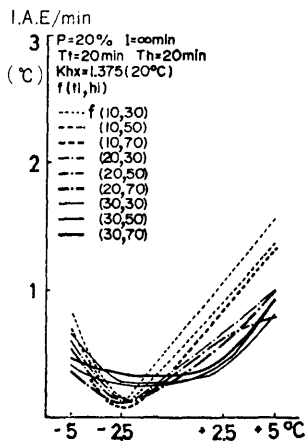
Fig. 8 Performance of temperature or humidity output against humidity desired value owing to change of humidity disturbance.

Fig. 9 Performance of temperature or humidity output against temperature desired value owing to change of temperature or humidity time constant in system.

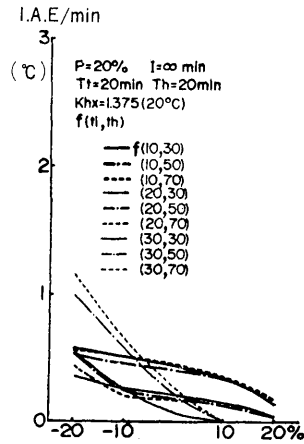
Fig. 10 Performance of temperature or humidity output against humidity desired value owing to change of temperature or humidity time constant in system.

min, $k_{hx}=1.375$ (20°C), 外乱は温湿度とも、なしに固定し、温度あるいは湿度初期値を変えて、目標値に対する動特性を調べる。ここで、温度初期値 t_i °C, 湿度初期値 $h_i\%$ であることを $f(t_i, h_i)$ と表わし、 $f(10, 30)$, $f(10, 50)$, $f(10, 70)$, $f(20, 30)$, $f(20, 50)$, $f(20, 70)$, $f(30, 30)$, $f(30, 50)$, $f(30, 70)$ の 9 通りの初期値の組合わせを作り、それぞれに、 $\pm 5^\circ\text{C}$, $\pm 2.5^\circ\text{C}$, $\pm 20\%$, $\pm 10\%$ の目標値を与えた。それゆえ、計 $9 \times 8 = 72$ 通りのデータを得る。そして、これらをまとめたのが Fig. 11, 12 である。すなわち、Fig. 11 が温度目標値, Fig. 12

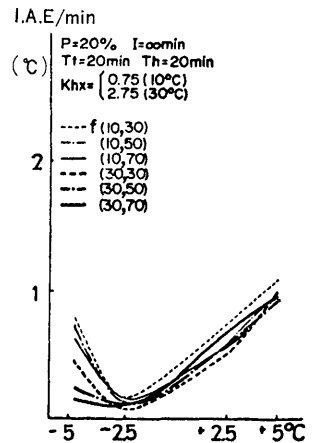
が湿度目標値を与えたときの I. A. E. 評価との関係を表わしたものである。横軸に目標値, 縦軸には (a) が温度, (b) が湿度評価をとってある。先に述べた操作部能力の条件より、温度初期値の違いはそのまま、一つの状態で適切な温度操作部能力を与えておけば、他の状態でも、同じ条件の操作部能力を得ることになる。すなわち、どの状態においても同じ温度差だけ制御可能となる。各状態における湿度制御能力は一定であるから、I. A. E. 評価の良い状態を選べば、必然的に最も有効的な温度制御能力を知ることができる。Fig. 11 は、この関係を表



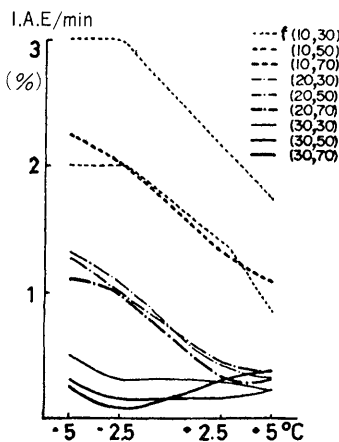
(a) temperature performance



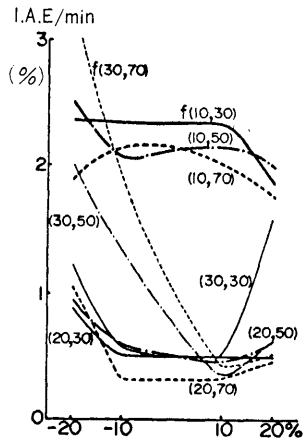
(a) temperature performance



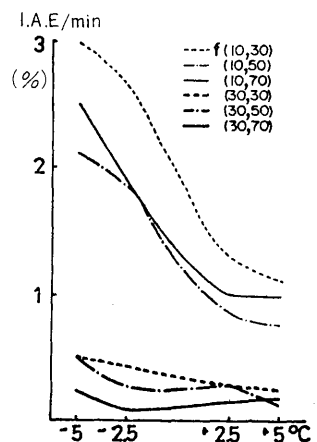
(a) temperature performance



(b) humidity performance



(b) humidity performance



(b) humidity performance

Fig. 11

Fig. 12

Fig. 13

Fig. 11 Performance of temperature or humidity output against temperature desired value owing to change of temperature or humidity initial condition in controlled system.

Fig. 12 Performance of temperature or humidity output against humidity desired value owing to change of temperature or humidity initial condition in controlled system.

Fig. 13 Performance of temperature or humidity output against temperature desired value owing to change of humidity gain between controlled system and controller (relative to absolute humidity).

わすグラフの一例であるが、これによって上記のことを説明する。このグラフは、 $f(30, 50)$ において最も評価がよい。このときの温湿度制御能力は、設定条件より、冷却機 1 台 3 A kcal, 加温機 8 A kcal, 除湿機 1 台 4.5 A $\times 10^{-3}$ kg, 加湿機 9 A $\times 10^{-3}$ kg となる。ただし、このときの A は制御対象内の湿り空気の kg 単位の重さである。この操作能力はいうまでもなく、30°C, 50%, 外乱 0 の状態にある制御対象を $\pm 5^\circ\text{C}$ 内で制御する場合最

も有効的に働く。次に同じ条件で、操作部の相対→絶対湿度変換係数 k_{hx} を 10°C の場合は、 $k_{hx}=0.75$, 30°C の場合は、 $k_{hx}=2.75$ のそれぞれの場合に対応するように変えたものを Fig. 13, 14 に示す。Fig. 13 は温度目標値、Fig. 14 は湿度目標値を与えたときの I.A.E. 評価との関係を表わしたものである。これによって、多少湿度特性が良くなるのがわかる。

Table 1 Performance of I. A. E. according to settle temperature (or humidity) time constant in Fig. 9, 10.

(a) temperature fixing					(b) humidity fixing					
Fig.	$T(T_t, T_h)$			I. A. E.	Fig.	$T(T_t, T_h)$			I. A. E.	
9	a	(20, 5)	(10, 5)	(5, 10)	big	a	(5, 20)	(5, 10)	(20, 5)	big
		(20, 10)	(10, 10)	(5, 5)	middle		(20, 20)	(20, 10)	(5, 5)	middle
		(20, 20)	(10, 20)	(5, 20)	little		(10, 20)	(10, 10)	(10, 5)	little
	b	(20, 5)	(10, 5)	(5, 5)	big	b	(5, 20)	(5, 10)	(20, 5)	big
		(20, 10)	(10, 10)	(5, 10)	middle		(20, 20)	(20, 10)	(10, 5)	middle
		(20, 20)	(10, 20)	(5, 20)	little		(10, 20)	(10, 10)	(5, 5)	little
10	a	(20, 5)	(10, 5)	(5, 5)	big	a	(5, 20)	(5, 10)	(5, 5)	big
		(20, 10)	(10, 10)	(5, 10)	middle		(20, 20)	(20, 10)	(20, 5)	middle
		(20, 20)	(10, 20)	(5, 20)	little		(10, 20)	(10, 10)	(10, 5)	little
	b	(20, 5)	(10, 5)	(5, 5)	big	b	(5, 20)	(5, 10)	(20, 5)	big
		(20, 10)	(10, 10)	(5, 10)	middle		(20, 20)	(20, 10)	(10, 5)	middle
		(20, 20)	(10, 20)	(5, 20)	little		(10, 20)	(10, 10)	(5, 5)	little

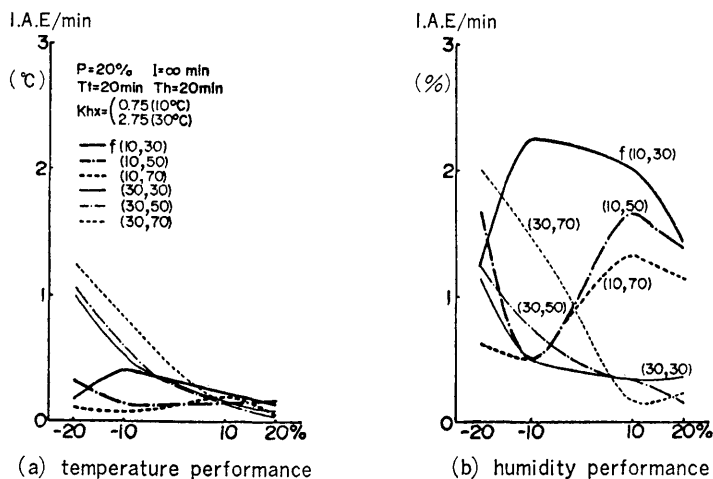


Fig. 14 Performance of temperature or humidity output against humidity desired value owing to change of humidity gain between controlled system and controller (relative to absolute humidity).

6. あとがき

温湿度二変数制御系を実測にもとづくシミュレーションで、その動特性を定性的に解明した。次段としては、さらに条件設定をこまかくし、ファイトトロン内の温湿度制御系の設計資料となる定量特性を明らかにしたい。

文 献

- 1) 船田周 他 1972 ファイトトロンにおける温度制御系のアナログシミュレーション. 生物環境調節 10 (2): 43-53.

- 2) 船田周 他 1972 温度制御系の動特性からみた設計について. 生物環境調節 10 (4): 160-170.

Summary

Dynamic-characteristic of temperature-humidity control system in Phytotron is obtained by analog-simulation.

Temperature and humidity are not separative in this control system. So, interference of these variables causes complex phenomena. Characteristic of this two variable control system is made clear by examination of analog-simulation. (Received October 2, 1972)