

プロセス制御系設計用 CAD ソフト (その10)

- 空調された部屋の物理モデル -

金原昭臣, 笠原雅人, 黒須 茂, 前澤裕介*

CAD Software For Designing Process Control System - Physical Model of an Air-Conditioned Room(Space) for Control -

Akiomi KIMBARA, Masato KASAHARA, Shigeru KUROSU,
Yuusuke MAEZAWA*

1. はじめに

空調システムは制御工学の観点から見るとまだまだ未発達であるため、モデリングにより動特性を明らかにし、制御パラメータを調整することは、ほとんどの空調設備において実現されていない。ところが近年のハイテク産業用空調などにおいては非常に厳しい温湿度条件が求められており、空調制御系をブラックボックスと考え、経験と努力により調整作業を行うことに限界がきているといえる。

さて、一般に制御系の設計においては、モデリングの問題が8割といわれている。しかし、モデリングによって得られた数学モデルが現実の制御系の動特性を近似的にでも表現されていないとしたら、その制御系の設計問題は無意味となる。

モデリングには大別して、つぎの2つの方法①理論的方法と②統計的方法がある。統計的方法は、入出力の実験データにAR(自己回帰)モデルなどを適用することによって、そのプラントの動特性を得る。筆者ら¹⁾は数年来この方法により、モデリングの研究を行っているが、得られたモデルの物理的特性に関して疑問がもたれていた。それに対して理論的方法は、プラントのエネルギー、物質収支を記述する偏微分方程式で表わされ、線形化しても高次元の複雑怪奇な数学モデルによって泣かされる地味な仕事とされてきた。

本研究では、部屋を数個に区分して、数学モデルをつくり、そのシミュレーション実験から低次元化されたモデルをつくる基礎資料を得るのがねらいである。

2. 目的

本研究では、ある高次元な数学モデルから、シミュレーション実験により、低次元化されたモデルをつくる基礎資料を得るのがねらいである。また、これによって今まで統計的に求められたモデリングデータにおける物理的裏付けを得ることができればよいと考えている。

この研究では、空調機でつくられた熱風なり冷風を吹出口にて供給する機器の非線形性よりも、いつも考えるような「大きな部屋が常に完全拡散である」という仮定の基に空調空間を一次おくれ系で近似することに疑問を感じ、部屋(空調空間)を数個に区分して数学モデルをつくり、その高次元なモデルにおいてシミュレーション実験を行うことを主眼とする。

3. 数学モデル

Fig.1にVAV制御の代表例を示す。

数学モデルをつくるにあたり、つぎの仮定をする。

- ①部屋を5つの領域に区分する。
- ②部屋の区分の仕方についてはFig.2のとおり。
- ③空気の流れについてはFig.3に示すとおり。
- ④5つの部屋はそれぞれ完全拡散とする。
- ⑤部屋の流れによる圧力変化は無視する。
- ⑥密度 ρ は一定とする。

これらにより、以下の値を用いて各領域ごとに熱の収支および水分の移動による微分方程式をたてる。各変数についている i はそれぞれの領域1~5が入ることを示している。

*平成7年度機械工学科卒業生(現大蔵省印刷局)

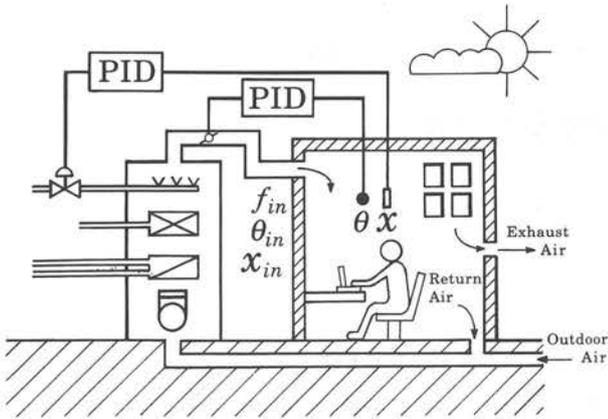


Fig.1 Typical VAV system

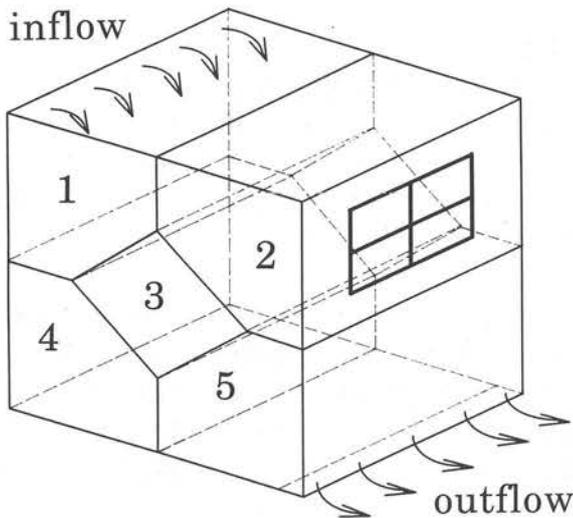


Fig.2 Divisions of a room

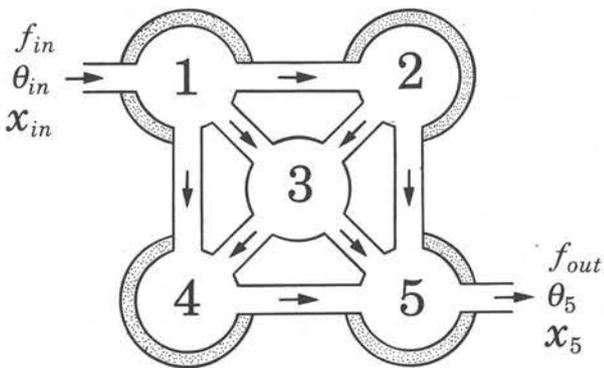


Fig.3 Typical heat and mass flow within a room

- C_i : 部屋の熱容量 [kcal/°C]
- C_{wi} : 壁の熱容量 [kcal/°C]
- α_i : 壁から部屋に通過できる単位熱量
熱貫流率×壁の表面積 [kcal/min°C]
- β_i : 同じく、外気から壁 [kcal/min°C]
- θ_i : 室内温度 [°C]
- θ_{wi} : 壁温度 [°C]
- θ_{in} : 給気温度 [°C]
- θ_o : 外気温度 [°C]
- c_p : 定圧比熱 (0.24 [kcal/kg°C])
- ρ : 空気の密度 (1.3 [kg/m³])
- $q(t)$: 発生顕熱 (1.5 [kcal/min])
- r : 比潜熱 (580 [kcal/kg])
- $p(t)$: 水蒸気発生量 (0.00133 [kg/min])
- $rp(t)$: 発生潜熱 (0.77 [kcal/min])
- V_i : 各領域の体積 [m³]
- f : 吹出風量 (4 [m³/min])
- x_i : 各領域の絶対湿度 [kg/kg (DA)]
- x_o : 外気絶対湿度 [kg/kg (DA)]
- x_{in} : 給気絶対湿度 [kg/kg (DA)]
- φ_i : 各領域の相対湿度 [%]

湿度を制御する場合、一般の空調においては相対湿度が扱われるが、数式モデルによって物質の移動を表現したいため、ここでは絶対湿度 x を計算に用いた。乾球湿度と相対湿度より変換を行った²⁾ので、後に示す結果については相対湿度で表現している。物理法則により得られた数学モデルを(1)(2)(3)式に示す。

室内の熱収支

$$\left. \begin{aligned}
 C_1 \dot{\theta}_1 &= w\theta_{in} - w\theta_1 + \alpha_1(\theta_{w1} - \theta_1) \\
 C_2 \dot{\theta}_2 &= \frac{w}{3}\theta_1 - \frac{w}{3}\theta_2 + \alpha_2(\theta_{w2} - \theta_2) \\
 C_3 \dot{\theta}_3 &= \frac{w}{3}\theta_1 + \frac{w}{6}\theta_2 + \frac{w}{2}\theta_3 + \alpha_3(\theta_{w3} - \theta_3) \\
 &\quad + q(t) + rp(t) \\
 C_4 \dot{\theta}_4 &= \frac{w}{3}\theta_1 + \frac{w}{4}\theta_3 - \frac{7w}{12}\theta_4 + \alpha_4(\theta_{w4} - \theta_4) \\
 C_5 \dot{\theta}_5 &= \frac{w}{6}\theta_2 + \frac{w}{4}\theta_3 + \frac{7w}{12}\theta_4 - w\theta_5 + \alpha_5(\theta_{w5} - \theta_5) \\
 &\quad \dots\dots(1)
 \end{aligned} \right\}$$

壁の熱収支

$$\left. \begin{aligned} C_{w1}\dot{\theta}_{w1} &= \alpha_1(\theta_1 - \theta_{w1}) + \beta_1(\theta_o - \theta_{w1}) \\ C_{w2}\dot{\theta}_{w2} &= \alpha_2(\theta_2 - \theta_{w2}) + \beta_1(\theta_o - \theta_{w2}) \\ C_{w3}\dot{\theta}_{w3} &= \alpha_3(\theta_3 - \theta_{w3}) + \beta_3(\theta_o - \theta_{w3}) \\ C_{w4}\dot{\theta}_{w4} &= \alpha_4(\theta_4 - \theta_{w4}) + \beta_4(\theta_o - \theta_{w4}) \\ C_{w5}\dot{\theta}_{w5} &= \alpha_5(\theta_5 - \theta_{w5}) + \beta_5(\theta_o - \theta_{w5}) \end{aligned} \right\} \dots(2)$$

室内の物質 (水分) 収支

$$\left. \begin{aligned} V_1\dot{x}_1 &= fx_{in} - fx_1 \\ V_2\dot{x}_2 &= \frac{f}{3}x_1 - \frac{f}{3}x_2 \\ V_3\dot{x}_3 &= \frac{f}{3}x_1 - \frac{f}{6}x_2 - \frac{f}{2}x_3 + \frac{1}{\rho}p(t) \\ V_4\dot{x}_4 &= \frac{f}{3}x_1 - \frac{f}{4}x_3 - \frac{7f}{12}x_4 \\ V_5\dot{x}_5 &= \frac{f}{6}x_2 + \frac{f}{4}x_3 + \frac{7f}{12}x_4 - fx_5 \end{aligned} \right\} \dots(3)$$

モデリングに使用した部屋の大きさは、2[m]×2.5[m]×2.5[m]であり、区分した5部屋の体積はすべて2.5[m³]とした。温湿度制御に用いるアクチュ

Table.1 Summary of significant parameters in the development of a room model

Zone <i>i</i>	1	2	3	4	5
C_i	1.56	1.56	21.56	21.56	21.56
C_{wi}	4.48	4.58	1.53	63.34	63.34
V_i	2.5				
α_i, β_i	0.04	0.06	0.01	0.21	0.21

エータは VAV ダンパー、加湿ヒーターとし、風量と加湿量を操作することで領域3を温湿度制御することを想定している。内部熱負荷としてはヒト1人が3, 4, 5の部屋に居ると仮定しているため、1, 2の部屋に比べ熱容量が高い。また、4, 5については地面を想定しているため、壁の熱容量が高くなっている。

今回のシミュレーションでは冷房加湿という特殊な空調を想定しているが、それに対して特に意味はない。単純ではあるが、以上のように物理モデルを構築する。各領域に使用したパラメータの一覧表は Table.1 に示したとおりである。

部屋のモデルに関してブロック線図を示したのが Fig.4 である

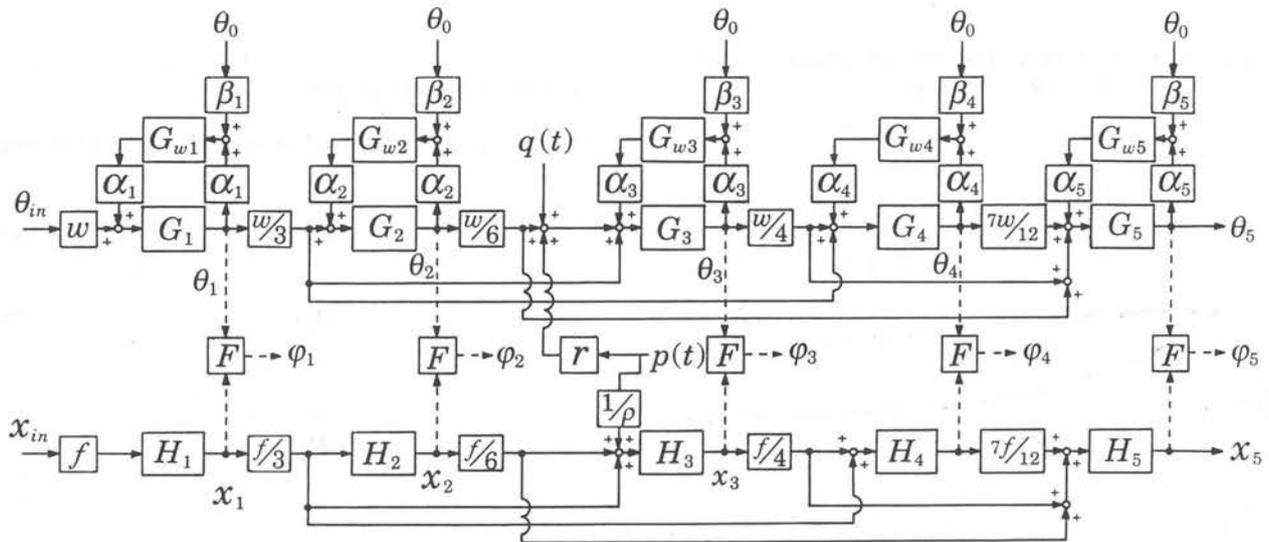


Fig.4 Block diagram of a room model

4. シミュレーション結果

4.1 給気熱量に対する温度、壁温度、湿度の応対
室内温度、室内湿度ともに初期状態を

外気温度 $\theta_o = 25[^\circ\text{C}]$

外気湿度 $x_o = 0.012[\text{kg}/\text{kg}(\text{DA})](60[\%])$

としたときに、

給気熱量 $w = fc_p\rho = 1.248[\text{kcal}/\text{min}^\circ\text{C}]$

吹出温度 $\theta_{in} = 13[^\circ\text{C}]$

吹出絶対湿度 $x_{in} = 0.008[\text{kg}/\text{kg}(\text{DA})](85[\%])$

のステップ入力を加えた場合の開ループ系の過渡応答を調べた。室内温度、壁温度、室内湿度の変化をFig.5~Fig.7に示す。

この結果により、熱容量の小さい領域1, 2は応答が速いが、熱容量の大きい領域3, 4, 5は応答が緩慢であり、人間ならびに床の影響が顕れていることがわかる。

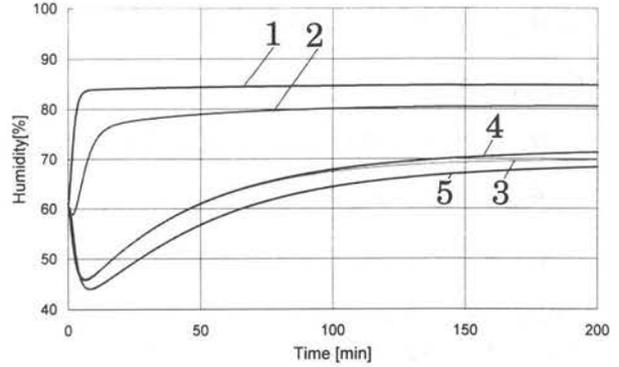


Fig.7 Transient response of open-loop system (Indoor relative humidity)

4.2 1次おくれ+むだ時間系による近似

得られた数式モデルより、温度に関して10次、湿度に関して5次の伝達関数となり、その極の位置を示すとFig.8のようになる。壁の応答は非常に鈍いため、ある操作に対する結果はすぐには顕れてこないと予想される。原点に集まった根(代表根)は、いわゆる壁による影響であり、その根を除去することで壁を無視

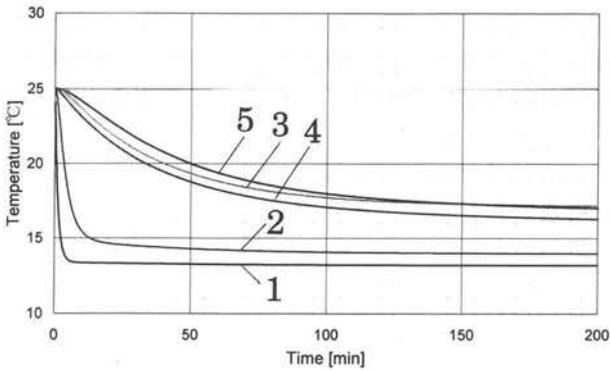


Fig.5 Transient response of open-loop system (Indoor temperature)

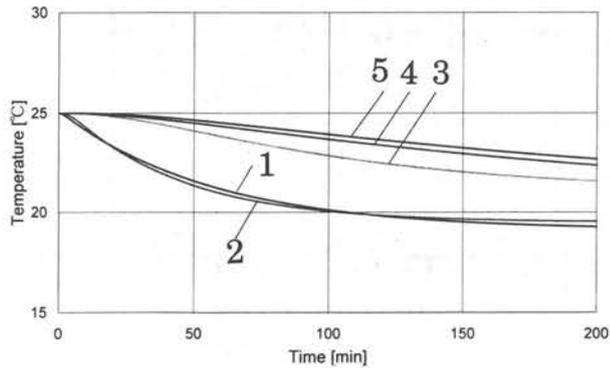


Fig.6 Transient response of open-loop system (Wall temperature)

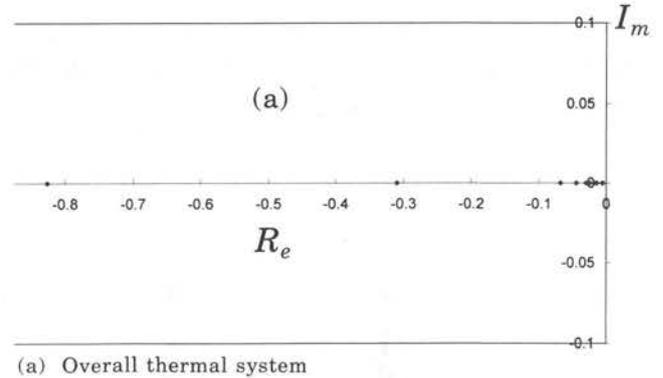


Fig.8(a) Location of poles of thermal model

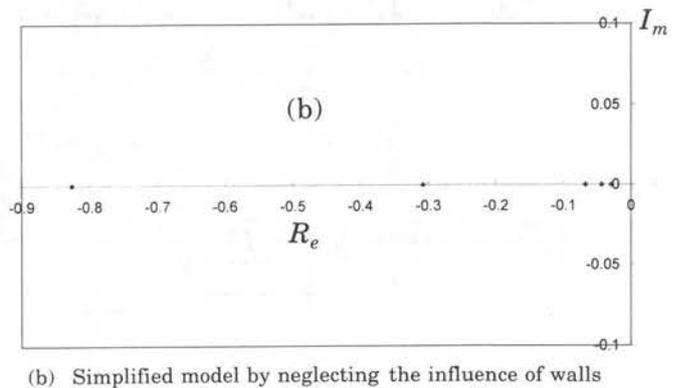


Fig.8(b) Location of poles of thermal model

した系に置き換えることができる。さらにそれを1次おくれ+むだ時間系で近似すると、つぎのようになる。

$$\frac{\Theta_3(s)}{F(s)} = \frac{3e^{-2s}}{1+36.1s} \quad \dots(4)$$

$$\frac{X_3(s)}{X_{in}(s)} = \frac{1.02e^{-0.4s}}{1+2.5s} \quad \dots(5)$$

Fig.9に温度に関して領域1~5に対して高次のモデルと1次おくれ+むだ時間系とのステップ応答を比較した結果である。下に示した応答が1次おくれ+むだ時間系である。この近似した系によってコントローラのパラメータを調整している。

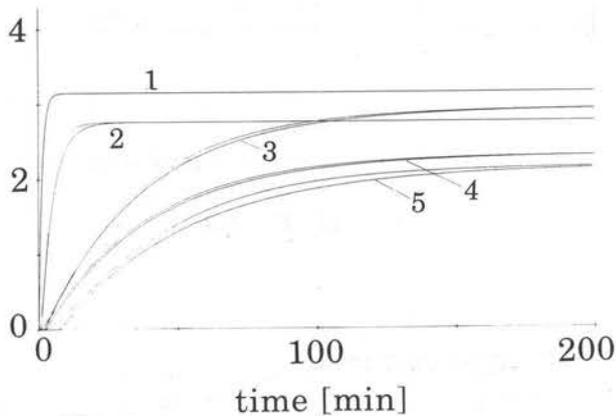


Fig.9 Comparison of step responses for zones

4.3 閉ループ系の過渡応答

つぎに、真中の領域3の温度・湿度に着目して目標値 ($\theta_r = 19[^\circ\text{C}]$, $\varphi_r = 70[\%]$)として、PI動作

$$f = k_{c1}\{\theta_3 - \theta_r\} + \frac{1}{T_{i1}} \int_0^t (\theta_3 - \theta_r) dt \quad \dots(6)$$

$$x_{in} = k_{c2}\{\varphi_3 - \varphi_r\} + \frac{1}{T_{i2}} \int_0^t (\varphi_3 - \varphi_r) dt \quad \dots(7)$$

を実施した。このさい、10次の伝達関数は壁を無視して1次遅れ+むだ時間系で近似し(4)(5)式により、限界感度法によりPIパラメータを求めた。室内温度と室内湿度の目標値応答を Fig.10~Fig.12に示す。この結果、温湿度 θ_3 , φ_3 についてPI制御により、オーバーシュートがなく速応性が顕著に増したとはいいいがたい。また制御量である湿度 φ_3 は安定しているように読みとれるが、吹出領域1の湿度 φ_1 についてはハンテイング現象が顕れている。

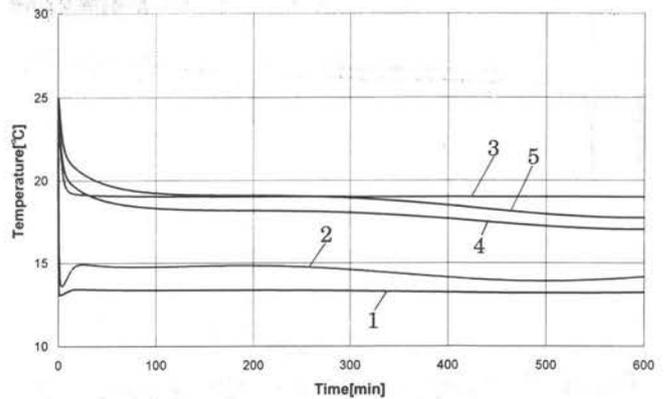


Fig.10 Transient response of closed-loop system (Indoor temperature) ($k_{c1}=4.3$, $T_{i1}=6.8$)

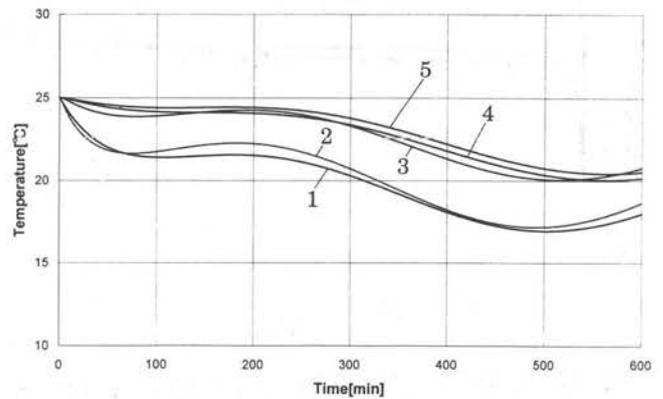


Fig.11 Transient response of closed-loop system (Wall temperature) ($k_{c1}=4.3$, $T_{i1}=6.8$)

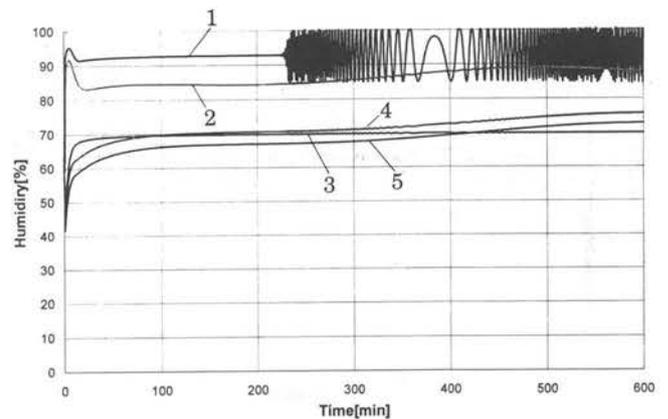


Fig.12 Transient response of closed-loop system (Indoor relative humidity) (a) ($k_{c2}=4.3$, $T_{i2}=1.4$)

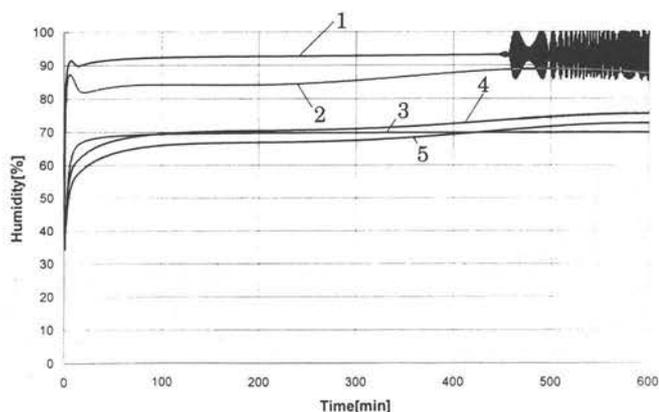


Fig.12 Transient response of closed-loop system (Indoor relative humidity) (b) ($k_{c2}=2.0, T_{i2}=1.4$)

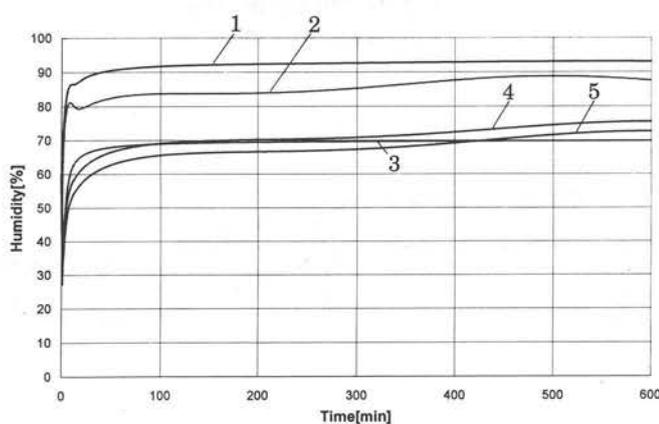


Fig.12 Transient response of closed-loop system (Indoor relative humidity) (c) ($k_{c2}=1.0, T_{i2}=1.4$)

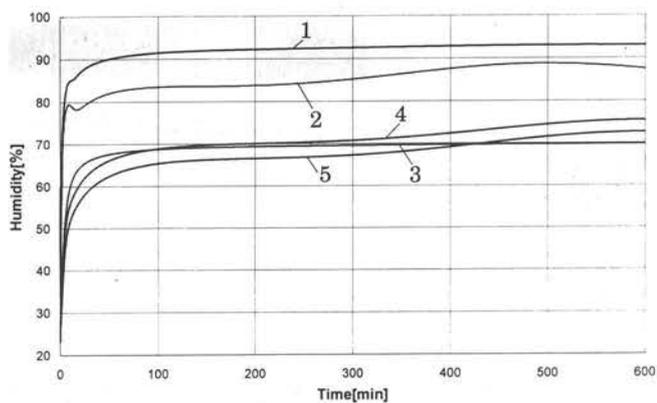


Fig.12 Transient response of closed-loop system (Indoor relative humidity) (d) ($k_{c2}=1.0, T_{i2}=1.7$)

つぎに、領域5の温度・湿度に着目して目標値 ($\theta_r = 19 [^{\circ}\text{C}], \phi_r = 70\%$)として、PI動作を実施した。室内温度と壁温度と室内湿度の目標値応答をFig.13~15に示す。これより湿度 $\phi_1 \sim \phi_5$ までハンテイング現象が顕れていて、安定化領域の将来が困難になっている。

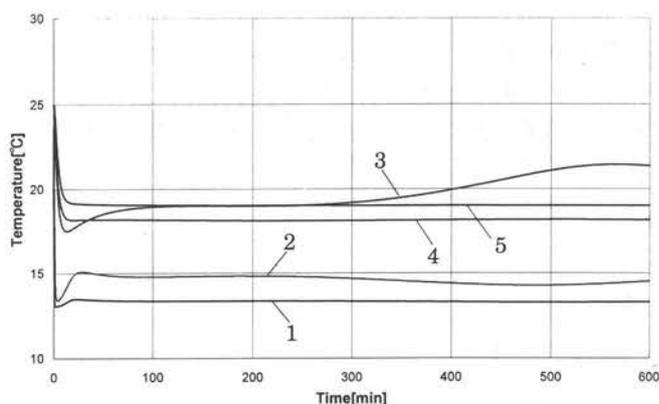


Fig.13 Transient response of closed-loop system (Indoor temperature) ($k_{c1}=4.3, T_{i1}=6.8$)

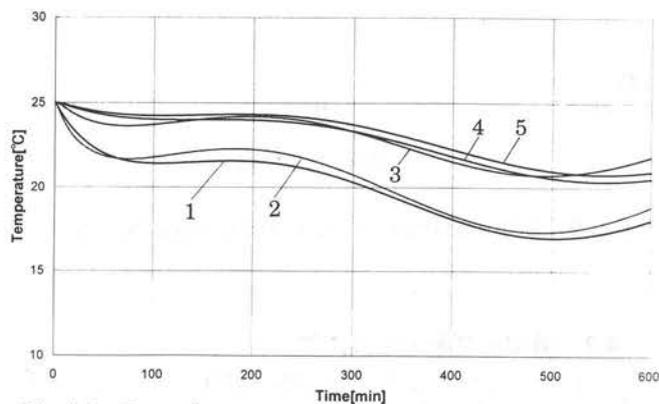


Fig.14 Transient response of closed-loop system (Wall temperature) ($k_{c1}=4.3, T_{i1}=6.8$)

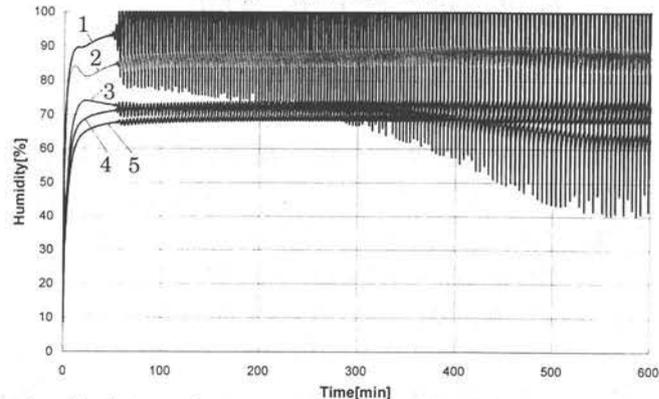


Fig.15 Transient response of closed-loop system (Indoor relative humidity) (a) ($k_{c2}=1.0, T_{i2}=1.7$)

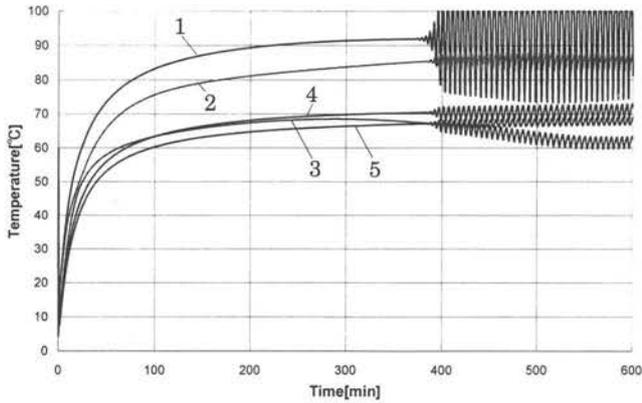


Fig.15 Indoor relative humidity
(b) ($k_{e2}=0.1, T_{i2}=1.7$)

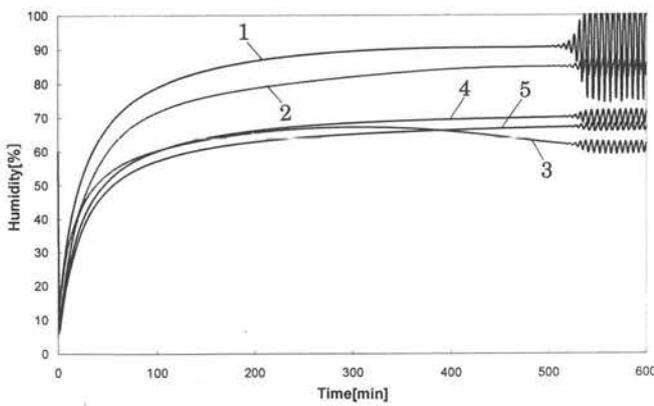


Fig.15 Indoor relative humidity
(c) ($k_{e2}=0.1, T_{i2}=2.4$)

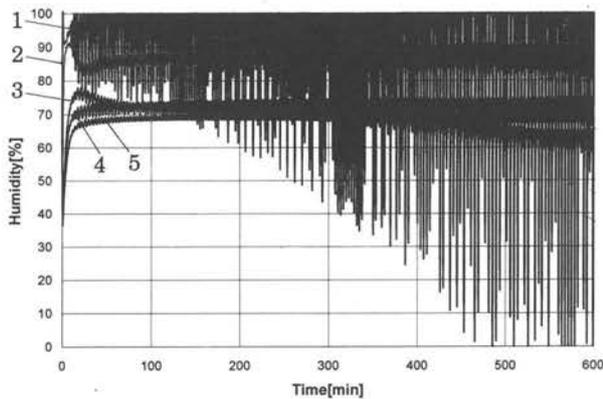


Fig.15 Indoor relative humidity
(d) ($k_{e2}=3.1, T_{i2}=2.4$)

5. おわりに

ビル空調において、個々の空調機器に関してそのシミュレーションモデルの研究例は多い。しかしながら、制御系設計のための対象（部屋）のモデルとなると、考慮すべき要因が多くて1次おくれ系などで近似しているようである。

本研究では、物理法則に基づいて数学モデルをつくり、建物の特性などがどのように絡み合うかを調べている。提案したモデルが空調制御に即座に役立つとは考えていないが、よりよいモデルづくりの一つの過程として本研究を意義づけている。

参考文献

- 1) A.Kimbara et al.: A Modeling of Environmental Chamber, ASHRAE Transactions, 101-1, 262/273 (1995)
- 2) 空気調和衛生工学便覧第12版, 72-93, 空気調和衛生工学会

(受理年月日 1996年 9月30日)