

正会員 奥山博康 (清水建設(株)研究所)

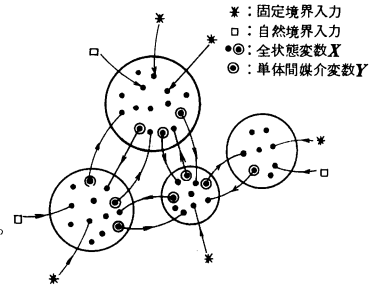
1.はじめに 建物がいかに冷暖房エネルギーの効率が良く設計されたとしても、あくまでも最終的にエネルギーを消費するのは冷暖房システムの機器である。従って、冷暖房負荷を電算機シミュレーションによって求める方法が実用化されて以来、空調の機器システムについてもシミュレーションしようという努力がなされ、事実多くの計算プログラムの概要が報告されている。しかし、この種のシミュレーションの理論とアルゴリズムの解決すべき問題点は何んであるかを正しくとらえてその解決法を提示したものは少ないようである。^{①②}そこで本論文はこれらの問題点を考察し、そのよりよい解決法について論じ提案するものである。

2.問題点 空調システムは空調される建物、蓄熱槽、熱源機器、熱交換器、搬送機器などそれぞれを一つの単体とみなし、これら単体が物理的プロセスによって相互連結して形づくられる。空調システムシミュレーションとはこの実物システムの温度、湿度、流量などの物理的状態量に注目し、その微分方程式モデルを作り、ダイナミックな時間積分を行っていくことにほかならない。工学的に必要な消費エネルギーなどはそれら物理的状態量の線型ないしは非線型変換によって二次的に求めることができる。そこでまず問題になってくるのは単体間の相互作用を正しくとった状態でいかに時間積分を行うかであり、これを「連立性の達成の問題」と呼ぶことにする。現在この問題への対応法として行われているのは大別して二通りある。一つは(1)線型サブシステムの接続法を用いるものであり、もう一つは(2)非線型サブシステムのままの接続法を用いるものである。(1)はさらに(1-i)陽的なものと(1-ii)陰的なものに分類される。(1-i)は熱伝導の時間積分では陽解法a)と呼ばれ、当シミュレーションではタイムスライシング法^③b)とか称されているが、a)については時間積分間隔が長いほど推移の不安定性が証明されるように^{④P.134}についても一時間等の長い間隔ではすでに数学的連立性はなくなっている。しかし、当シミュレーションでは単体の出力状態量が固定されていたりすることにより、そのタイムスライシング法でも問題が顕在化することは少ないようである。また(1-ii)によって成功している例は文献①の場合であり、これは伝達関数法に基本をおいているが、そのために単体自体に構造的な変化がある場合などには対応できないし、単体間の媒介変数についての連立方程式を各タイムステップ毎に解くようになっているので計算時間もかかると思われる。(2)の例は冷凍機^⑤の非線型のサブルーチンと冷却塔のそれを入出力を継いで、くり返し計算をすることによって解に達せしめる場合などがあり、くり返し^⑤の各回での近似線型システムの状態遷移行列の固有値が絶対値が1以下であることから収束性の証明がなされる。しかしこの方法は計算法の背景的理論とは言い難く、後述するようなアルゴリズムによらないかぎり汎用性もない。本論文の連立性確保の理論は(1-ii)の大別に属するものであるが状態空間法に基本をおくものであり、また毎時刻に連立方程式を解く必要はない。もう一つの問題点としては無限に近い単体間の組み合わせと種々の運転モードを持ちうる一般空調システムを同一の計算プログラムでシミュレーションできるかどうかということがある。これを「汎用性の達成問題」と呼ぶことにする。今もし全ての単体が線型サブシステムとして記述できるとすれば本論文または文献①の理論によって以上二つの問題は解決することができる。しかし実際には、線型化が難しい単体を連結するアルゴリズムも併用し、全体はハイブリッドなプログラム構成とした方がよい。ただし初期の開発において行なわれてきたように熱量で連結させるのはシミュレーションとは言えないから、^⑤の定義あくまで温度、湿度、流量などの物理的状態量で連結させる方法でなければならない。そし

ここで論じる方法はこれら媒介変数をラベルではなく、間接アドレス指定 (Indirect Addressing) により第二の問題を解決するものである。

3. 連立性の達成法 全体システムを構成する単体のうち j 番サブシステムにおいて(1)のようなシステム動的方程式が記述できる。もしそれが建築物^①、蓄熱槽^②の場合についてはすでに述べてあるし、非線型性を持つ単体についてもその状態ベクトルによるヤコビアンをコンダクタンスマトリックス C_j^* にとることにより近似線型化することが可能である^③。ここでは簡単のため入力 $f_j(t)$ は階段関数とし、(1)の固有値解析をすれば(2)の漸化式を得る^④。システム全体の状態ベクトル X は単体総数を n とし、 $X = x_1 + \dots + x_n$ と各サブシステムの状態ベクトル x_j の直和で定義される。 x_j のうち他単体への入力となるもの、すなわち単体間の媒介変数による部分空間を y_j とする。従って全体システム中の全媒介変数の状態ベクトルを Y とすれば $Y = y_1 + \dots + y_n$ である。 f_j は Y および系外からの固定境界入力 x_0 と自然境界入力 g の部分空間によって構成されるから(4)式が成立する。従って j 単体の内部状態変数も含めて全出力 $x_j(k)$ は、(2)の右辺を(3)、(4)の関係により X 、 Y 、 x_0 、 g によって(5)のように記述できる。 x_j のうち他単体への入力となるものは y_j であるが、それらの、 x_j において位置する行を(5)から抜き出すことにより(6)の出力方程式が得られる。各単体からの(6)式の直和により $Y(k)$ を表わせば(7)、(7)となり、これは $Y(k)$ について(8)のように解くことができる。 W_x 、 W_0 、 W_g の内容は(8)、(9)、(10)、(11)で表わされる。(8)式は、いわば媒介変数に関する状態推移の漸化式となっている。注意すべきは W が積分間隔 Δt 、および運転モードが与えられたときには定数マトリクスとなることであり、これゆえ有限個数の運転モードが存在し得るときにはその数だけの W をシミュレーションの前に用意しておけば、タイムステップ毎に連立方程式を解く必要はないということである。

Fig. 1 システムの概念図



主な記号

- t : 時刻
- k : 時刻番号
- x_j : j 番単体の状態ベクトル
- f_j : " への入力ベクトル
- C_j^* : " のコンダクタンスマトリクス
- ϕ_j : " の推移マトリクス
- U_{uj} : " の駆動マトリクス
- X : 全体システムの状態ベクトル
- Y : " の媒介変数ベクトル
- y_j : j 単体からの出力ベクトル
- x_0 : 系外固定境界入力ベクトル
- g : 系外自然境界入力ベクトル
- E : 単位マトリクス
- S : 行部分マトリクス

$$\dot{x}_j(t) = C_j^* \cdot x_j(t) + f_j(t) \dots \dots \dots (1)$$

$$x_j(k) = \phi_j(\Delta t) \cdot x_j(k-1) + U_{uj} \cdot f_j(k) \dots \dots \dots (2)$$

$$x_j(t) = R_{xj} \cdot X(t) \dots \dots \dots (3)$$

$$f_j(t) = R_{yj} \cdot Y(t) + R_{oj} \cdot x_0(t) + R_{gj} \cdot g(t) \dots \dots \dots (4)$$

$$x_j(k) = \phi_j(\Delta t) \cdot R_{xj} \cdot X(k-1) + U_{uj} \cdot R_{yj} \cdot Y(k) + U_{uj} \cdot R_{oj} \cdot x_0(k) + U_{uj} \cdot R_{gj} \cdot g(k) \dots \dots \dots (5)$$

$$y_j(k) = S_{xj} \cdot X(k-1) + S_{yj} \cdot Y(k) + S_{oj} \cdot x_0(k) + S_{gj} \cdot g(k) \dots \dots \dots (6)$$

$$Y(k) = y_1 + \dots + y_n = \begin{pmatrix} S_{x1} \\ \vdots \\ S_{xn} \end{pmatrix} X(k-1) + \begin{pmatrix} S_{y1} \\ \vdots \\ S_{yn} \end{pmatrix} Y(k) + \begin{pmatrix} S_{o1} \\ \vdots \\ S_{on} \end{pmatrix} x_0(k) + \begin{pmatrix} S_{g1} \\ \vdots \\ S_{gn} \end{pmatrix} g(k) \dots \dots (7)$$

$$= \bar{S}_x \cdot X(k-1) + \bar{S}_y \cdot Y(k) + \bar{S}_o \cdot x_0(k) + \bar{S}_g \cdot g(k) \dots \dots (7')$$

$$\varphi = (E - \bar{S}_y)^{-1} \dots \dots \dots (8) \quad W_x = \varphi \cdot \bar{S}_x \dots \dots \dots (9)$$

$$W_0 = \varphi \cdot \bar{S}_o \dots \dots \dots (10) \quad W_g = \varphi \cdot \bar{S}_g \dots \dots \dots (11)$$

$$Y(k) = W_x \cdot X(k-1) + W_0 \cdot x_0(k) + W_g \cdot g(k) \dots \dots \dots (12)$$

また熱容量の比較的大きい蓄熱槽、建物などの単体に比べ、熱容量の小さな金属でできている機器

類の単体は $S_{ij} = [0]$ とおくことにより一般性は失わずに扱える。全体システムの時間積分は次の①②のアルゴリズムを繰り返すことにより行える。① $k-1$ 時の全状態ベクトル $X(k-1)$ と k 時の系外入力 $x_0(k)$, $g(k)$ とにより②式から k 時の媒介変数状態ベクトル $Y(k)$ を求める。② 各単体サブシステムにおいて②式により k 時の状態ベクトル $x_j(k)$ を決定する。

4. 汎用性の達成法 この節では前節の連立化と汎用化理論で処理しきれない、ないしは効率が悪い部分にタイムスライシング法（陽解法時間差分の積分）で対応することにし、その汎用化のアルゴリズムについて論ずる。非線型ないしは不連続的な中味のままサブルーチン（以下 SR.）化しておくものは大別して次の 4 種になる。i) 熱源機器、熱交換器、搬送機器などの単体機器についての計算 SR.（以下 APRS・SR.） ii) システム全体ないしは APRS・SR. 自体の運転モード番号を媒介変数あるいは運転スケジュールから決定するのをコントロール SR.（CNTL・SR.） iii) APRS・SR. または CNTL・SR. より出力された変数を単に加減乗除するアリスメテック SR.（ARMC・SR.） iv) 出力された変数値を集計、積算したりしてあらかじめ決められたフォーマットに従って書き出すレポート SR.（RPTG・SR.）である。APRS-SR. については各社それぞれに開発されている現状にあるが今後は関連学会等を中心にしてその標準化を行うべきである。これさえしっかりしていればシステム全体でのメインプログラム（以下メイン PGM.）も標準化されたことになる。なぜならば以下に述べるアルゴリズムによってメイン PGM. を作れば、それは単にこれら SR. を並べただけの、単純で客観性を持ち、かつ検討しやすい（clear to investigate）ものになるからである。

さて全ての SR. に、通しで絶対番号を付けておく、この番号を SR. NO. と呼ぶことにする。ユーザーが参照するマニュアルは次の二種類ある。i) SR. マニュアル：各サブルーチン入出力アーギュメント内の変数、配列の内容をその順番に従って説明したもの。ii) データマニュアル：機器の性能特性データおよび気象データ等が何番地に入っているか説明したもの。このデータ領域を配列 DROM(i) とする。また SR. 間の媒介変数と出力変数について SR. が読みとりと格納を行う領域の配列を DRAM(j) とする。この何番地をどの変数値に割り当てるかはユーザーが決定する。さらにメイン PGM. 内で用いる三つの重要な配列を次のように定義しておく、i) NSR(m, n_c)：各タイムステップで CNTL・SR. により運転モードが m 番と決定されたとする。このモードで n_c 番目に SR. NO. 何番を実行するかの情報を持つ。ii) NIPT(m, n_c, i)： m モードで n_c 番目の実行 SR. の入力アーギュメント内 i 番目の変数値を DRAM あるいは DROM 何番地から持ってくるか。iii) NOPT(m, n_c, j)：同じくその SR. の出力アーギュメント j 番目の変数値を DRAM 内何番地に格納するかの情報を持つ。以上の配列の定義によりメイン PGM. のシミュレーション部分の具体的な構造は次のようになる。まず時間積分のタイムループが一番外側にあり、その中ではじめに CNTL・SR. 群を通過し、そのタイムステップで実行すべき総 SR. 個数 $n_{c\max}$ と運転モード m を決定する。このあとに 1 から $n_{c\max}$ の SR. ループがあり、その中には SR. マニュアルに記載されている全 SR. がその SR. NO. 順に並べられている。例えば k 番 SR. に対しては Fig. 2 のようになる。ここに Fig. 2 中の A_{k3} とは機器特性データなどが入るべき配列であり、ユーザーはデータマニュアル（DROM）からしかるべきデータグループの先頭番地を NIPT($m, n_c, 3$) に入れておけばよい。もし SR. 間で入出力変数が DRAM 内の同一番地を共有していればこれらの SR. は連結されたことになる。また冷凍機と冷却塔の繰り返し計算をやりたい場合にはそれらの SR. NO. を交互に、繰り返ししたい回数だけ NSR(m, n_c) に入れておけばよい。この場合、もちろん DRAM 内で片方の出口温度ともう一方の入口温度の番地を共有させておく、NSR, NIPT, NOPT の内容作成はシミュレーションループに入るまえに例えば Fig. 3 のように行える。これら配列の作製は FORTRAN レベルで行うと、ユーザーにとって多少面倒になることが予想されるためマクロな専用言語を開発す

るのもよいであろう。換言すれば各社開発の余地があるとすればこのような機能部分と RPTG・SR. の機能のみとなる。とにかくメインPGM. のシミュレーション部分に関しては、完全な汎用性を持たそうとする限り、FORTRAN レベルでは前述のように構成しておくしかないであろう。

5. 単体の計算理論 建物の負荷シミュレーションは伝達関数法的に行うのが一般化しているが^⑧、蓄熱槽なども含め動的扱いが必要なこれら単体に関しては状態空間法的に扱った方が都合の良い点が多いのではないと思われる^⑨。これはサブシステム間の接続理論に一般性を持たせるためにも必要であることは3. で述べた。

著者はまた熱源機器の APRS・SR. も作製した経験を持つが、それを通じて気付いたこともある。例えば太陽熱集熱器についてもメーカーの性能データから回帰して作る帰納的モデル^(Whillier のモデル)と、その物理現象を微分方程式記述して解く、演繹的モデル^{⑩, ⑪}が作れるが、前者は現実にその製品が存在する場合には最もよく合うモデルになる長所を持つが、存在しない単体を予測評価することは不可能であり、後者の方法によらねばならないということがある。しかしこの種のメインPGM. 自体の目的から、後者のような機能が要求されることはまれであり、しかも計算経済性のことも考えると主な機器は適当な回帰式モデルとする方法が良いと思われる。ただし冷却塔、熱交換器のように内部メカニズムが比較的単純なものはその物理プロセスを微分方程式記述し、伝熱の空間積分も解析的に行えるから演繹的モデルの方がやはり良い。そのサブシステム内部のパラメーターである総括物質移動係数や熱貫流係数は設計条件から同定できるのである。また物理現象は常にマイクロにとらえればとらえるほど確率的、不確定的になってきてシミュレーションはむずかしくなることから、冷却コイルについても (I_a, X_a, I_w) を状態ベクトルとするマクロな状態遷移常微分方程式をたて非線型的(内部パラメーターを変えながら)に有限分割区間の空間積分をするようなモデルの方が良いのではないと思われる^⑫。

6. まとめ 空調システムシミュレーションプログラム開発上の問題点が連立性確保と汎用性達成にあることを論じ、前者と後者に対しては、単体からの出力方程式の直和による状態空間法的サブシステム接続理論を、また補助的に、後者に対してはデータ配列を間接的にアドレッシングするアルゴリズムを提示した。

7. 参考文献 ①「空調装置運転シミュレーションプログラム(AIRSIM)」中尾、末永、松浦(電々研究実用化報告第26巻第2号, 1977), ②「多数室室温変動の実用的計算法と断熱雨戸の熱的效果の検討例」宇田川、木村, 建築学会論文報告集, 昭和53年3月, ③「空調システムシミュレーションプログラム例」福島, 建築設備と配管工事, 1979. 4月, ④「建築物の熱回路系における推移行列と射影分解による時間積分公式」奥山、木村, 建築学会論文報告集, 第269号 昭和53年7月, ⑤ASHRAE: Procedures for simulating the performance of components and systems for energy calculations. (3rd Edition)1975 ⑥「蓄熱槽の数値解析」奥山, 建築学会全国大会梗概集 昭和56年9月, ⑦「線形システムの観測と同定」古田(コロナ社), ⑧「線型代数入門」斉藤正彦(東大出版会), ⑨「FORTRAN N Program to Calculate Heat Flux Response Factors for Multi-Layer Slab, Computer Program」№26, 1967, Division of Building Research, National Council Research. ⑩「熱回路網数値解析法による熱空調負荷計算プログラム-LOAD1」奥山、森野、清水建設研究所報 Vol. 31, 1979. 10, ⑪通産省委託, 昭和55年度新住宅開発プロジェクト研究成果報告書「住宅における自然エネルギー利用システムの調査研究」財団法人, エネ総研 昭和56年3月, ⑫「平板型集熱器性能評価に関する研究」木村、宇田川, 空調冷凍連合講演会梗概集, ⑬「空調機調機器特性データの多項式近似」中尾、大島, 空衛学会論文集№11, 1979, 10月, ⑭「空調システムのシミュレーションプログラムの開発」亀島、他, 空衛学会論文集№15, Feb. 1981, ⑮「熱回路数値解析法による自然空調に関する研究」木村、奥山(建築学会梗概集, 昭和51年)

Fig. 2 (例) k番SR.に対応するメインPGM.の部分

```

k  CONTINUE
   IF (NSR(M,NC), NE, k) GO TO k+1
   Ak1=DRAM (NIPT(M,NC,1))
   Ak2=DRAM (NIPT(M,NC,2))
   DO L1 L=1,27
   Ak3(L)=DROM(NIPT(M,NC,3)+L-1)
R1  CONTINUE
   CALL SRk (Ak1, Ak2, Ak3, Ak4, Ak5)
   DRAM (NOPT(M,NC,1))=Ak4
   DRAM (NOPT(M,NC,2))=Ak5
   GO TO k+1

```

Fig. 3 (例) NIPTへ入力するメインPGM.の部分

```

R2  CONTINUE
   READ (R3) N1, N2, N3, N4
R3  FORMAT (4I10)
   IF (N1,EQ,0) GO TO R4
   NIPT (N1,N2,N3)=N4
   GO TO R2
R4  CONTINUE

```