

# 熱・換気回路網モデル計算プログラム NETS の検証

奥山 博康

清水建設機技術研究所

〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17/okuyama@sit.shimz.co.jp

## Verification of Thermal and Airflow Network Model Simulation Program NETS

Hiroyasu Okuyama

Institute of Technology, Shimizu corporation

4-17, Etchujima 3-chome, Koto-ku, Tokyo 135-8530

okuyama@sit.shimz.co.jp

NETS, a heat and air transfer system simulation program for buildings, has proven to be an exceptional research tool in the study of architectural energy savings methods, thermal and air quality, natural ventilation, and water vapor condensation problems. NETS has a high degree of modeling freedom and thereby enables investigation into newly devised architectural processes. NETS is suitable to application for the calculation of systems by architectural means rather than by the mechanical building services. Although, in recent years the development of heating and cooling load calculation functions have also been included. This paper describes the fundamental calculation theory and also the verification results of the thermal load bench mark test introduced.

**Keywords:** thermal network model, airflow network model, thermal load calculation, verification /  
熱回路網, 換気回路網, 熱負荷計算, 検証

### 1. はじめに

建築の伝熱・換気のシステムシミュレーションのために熱・換気回路網モデルによる NETS と呼ぶ計算プログラムを開発してきた。一つの特長はモデル化の自由度が高く汎用性に優れていることであり、建築設備や意匠の設計者や開発者が考案する新たな工夫を自由に計算モデル化し、検討できることを狙いとしている。開発当初に想定した計算対象物は、パッシブソーラーハウスであった。ある種のパッシブソーラーハウスでは、空気の循環の経路の変更や断熱パネルの開閉を時間帯や季節あるいは温度状況によって変化させることで熱移動の制御を行うが、これは計算モデルの構造がスケジュールやフィードバック制御で変化することであり、NETS はこうした変化の模擬に適している。この他にも、適度な室内環境をなるべく機械力に頼らず、建築的手法で実現するための検討にも適している。従って熱負荷計算機能は後になって開発を進めた。今年はじめに熱負荷計算のベンチマークテストを試みたので検証結果として報告する。また NETS での熱負荷計算に関する方法についても述べる。

### 2. 熱回路網の計算モデル

熱回路網の数学モデルは、何らかの空間的離散化手法によって得られる熱容量節点系とも呼んでいるモデルに関するもので、節点  $i$  と節点  $j$  の間の伝導、放射、対流伝達、移流や貫流などの全ての熱移動形態を一般化熱コンダクタンス  $c_{i,j}$  と呼ぶ種類の係数で表現している。また節点に関する熱収支式は、次式のようにそれぞれの節点は他の全ての節点と熱的に結びついているとする完全連結システムの節点方程式と呼ぶもので定義している。ここに  $x_i$  は節点  $i$  の温度、 $m_{i,j}$  は節点  $i$  に関する熱容量、 $c_{i,j}$  は節点  $j$  から  $i$  に向かう一般化熱コンダクタンス、 $g_j$  は総個数  $ng$  のうちの  $j$  番の発熱源、 $r_{i,j}$  は  $g_j$  から  $i$  番節点に流れ込む比率を表す。また  $no$  は外気温度の様な既知数扱いの温度の総節点数であり、 $n$  は未知数扱いの温度の総節点数である。(1)の計算対象物の空間次元や形に依存しない一般的な成り立つ完全連結システムの節点方程式により、熱容量節点系の全体でも(6)式のベクトル・マトリックスの常微分方程式が構成

$$\sum_{j=1}^n m_{i,j} \cdot \dot{x}_j = \sum_{j=1}^{n+no} c_{i,j} \cdot (x_j - x_i) + \sum_{j=1}^{ng} r_{i,j} \cdot g_j \quad (1)$$

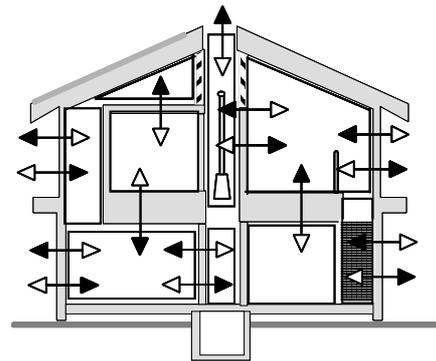


図1 換気回路網モデルのイメージ

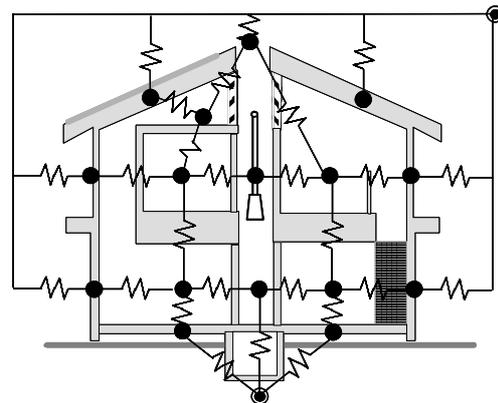


図2 熱回路網モデルのイメージ

される。この式をシステム理論の応用数学にならって状態方程式と呼んでいる。ここに状態ベクトルを(2)式で、規定入力ベクトルを(3)式で、自由入力ベクトルを(4)式で定義し、これらをまとめた入力ベクトルを(5)式で定義している。

$$\mathbf{x} = {}^t(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_0 = {}^t(x_{n+1}, \dots, x_{n+no}) \quad (3)$$

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}^t (g_1, g_2, \dots, g_{ng}) \quad (4)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{C}_o \cdot \mathbf{x}_o + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g} \quad (5)$$

$$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{C}_o \cdot \mathbf{x}_o + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g} \quad (6)$$

計算対象物によって異なってくるのはシステムのパラメータ  $c_{i,j}, m_{i,j}, r_{i,j}$ , か, モデルのサイズ  $n, n_o, n_g$  だけである. 計算対象物に応じてゼロでないシステムパラメータだけを与えれば, 与えていないシステムパラメータは何もしなくてもゼロである. 以上のことが全体方程式を構成したり, 常微分方程式を解く計算プログラムが完全な汎用性を持つ理由である. さらに空間離散化の手法は有限体積法をとることが多いが, 部分的に有限要素法を用いても, これらの異なった手法による部分的なモデルを融合して, 全体システムについても上記の方程式モデルで一体的に計算することが可能であるように工夫している. この工夫とは, 従来の有限要素法の境界条件に関連する定式化の改良と, システムパラメータの添字番号定義に関するものである.

### 3. 時間積分

温度などの状態値の時間変化をシミュレートしていくことは常微分方程式の時間積分を行うことに帰着する. 従来用いられている時間積分法には多くの種類があるが, それらは全て近似解である. これに対して筆者は厳密解を提示している. これを射影分解による解析的時間積分法と呼んでいる. しかしこの厳密解を得るためにはシステム・マトリックスの固有値解析が必要であり, 大次元マトリックスの場合は確実に迅速に固有値を求めるのは多くの場合困難である. そこで実用上は近似時間積分法を用いることになるが, この場合最も重要なのは計算安定性である. 安定性のために空間的また時間的な離散化に条件が付くことによって, 計算時間と主記憶容量が増大することになり, 実用性を損なうことが多いからである. NETS で多く用いられるのは完全陰伏解法 (後退差分) である. さらにこの解法において必要となるシステムマトリックスの逆行列計算量を軽減するために, その行方向を分割し, 近似的に逆行列を計算する方法も適用できる. あるいは状態方程式の濃縮理論によって実質的な節点数を減らし, 計算機的な経済性を向上する方法も適用できる. この濃縮法は, 将来空間的自動メッシュ分割などを適用した場合に問題になるであろう節点数の過度の増大を解決する方法としても期待できる.

数学モデルの状態方程式は(6)式として得られた. これは時間積分することによってシミュレーションが行なわれる. この形式解は推移行列を用いて重畳積分で表わされる. この形式解では内部の時間関数が陰になっているので実際の積分を行うことができない. そこで, (7)式のシステムマトリックスに関する固有値  $\alpha_i$  と対応する射影子  $P_i$  による射影分解によって, 推移行列は(8)式で表される各固有空間上の陽な表示になる. 入力ベクトル  $\mathbf{f}^*$  を(9)式で定義し, 実際に計算できる解析解が(10)式で得られる.

$$\mathbf{C}^* = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{C} \quad (7)$$

$$\Phi(t) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{\alpha_i \cdot t} \quad (8)$$

$$\mathbf{f}^* = \mathbf{M}^{-1} \cdot (\mathbf{C}_o \cdot \mathbf{x}_o + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g}) \quad (9)$$

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{\alpha_i \cdot (t-t_0)} \cdot \mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{\alpha_i \cdot (t-\tau)} \cdot \mathbf{f}^*(\tau) d\tau \quad (10)$$

$\mathbf{f}^*(t)$  が数式記述できないような不規則入力であれば, まず時間的離散データになおし, それらの  $\Delta t$  間隔の2点間を線形補間するか階段関数補間するかによって有用な時間積分公式をつくっておくことができる.  $k$  を時刻番号とし, 前者については次式となる.

$$\mathbf{x}(k\Delta t) = \Phi(\Delta t) \cdot \mathbf{x}((k-1)\Delta t) + \mathbf{U}_o \cdot \mathbf{f}^*((k-1)\Delta t) + \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{f}^*(k\Delta t) \quad (11)$$

ここに時間離散的駆動マトリックス  $\mathbf{U}_o, \mathbf{U}_1$  は, 次の(12), (13)式で表され, 内部の係数  $a$  は(14), (15)式で計算されるものである.

$$\mathbf{U}_o = \sum_{i=1}^n P_i \cdot a_{io} \quad (12)$$

$$\mathbf{U}_1 = \sum_{i=1}^n P_i \cdot a_{i1} \quad (13)$$

$$a_{io} = -\left(\frac{1}{\Delta t}\right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i}\right)^2 \cdot e^{\alpha_i \Delta t} + \left(\frac{1}{\Delta t}\right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i}\right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha_i}\right) \cdot e^{\alpha_i \Delta t} \quad (14)$$

$$a_{i1} = \left(\frac{1}{\Delta t}\right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i}\right)^2 \cdot e^{\alpha_i \Delta t} - \left(\frac{1}{\Delta t}\right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i}\right)^2 - \left(\frac{1}{\alpha_i}\right) \quad (15)$$

また階段関数的な入力の変化に対する時間積分漸化式も作っておくことができる.

$$\mathbf{x}(k\Delta t) = \Phi(\Delta t) \cdot \mathbf{x}((k-1)\Delta t) + \mathbf{U}_s \cdot \mathbf{f}^*(k\Delta t) \quad (16)$$

ここに駆動マトリックス  $\mathbf{U}_s$  は次式で計算される.

$$\mathbf{U}_s = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i}\right) \cdot (e^{\alpha_i \Delta t} - 1) \quad (17)$$

一方実用上は近似積分も有用である. 1つは無条件に推移安定であり,  $m_{jj}$  がいくつ0になっても解が求まる時間的後退差分は次式で表わされる.

$$\mathbf{x}(k\Delta t) = \Phi_i(\Delta t) \cdot \mathbf{x}((k-1)\Delta t) + \mathbf{U}_i \cdot \mathbf{f}(k\Delta t) \quad (18)$$

ここに近似推移行列と駆動マトリックスは次式で計算される.

$$\Phi_i(\Delta t) = \left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t} - \mathbf{C}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t}\right) \quad (19)$$

$$\mathbf{U}_i = \left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t} - \mathbf{C}\right)^{-1} \quad (20)$$

また大次元のマトリックス演算が困難な場合に用いる時間的前進差分は次式で表される. 逆行列や固有値の計算を必要としないから, 大きな節点数でも適用でき, 節点毎の陽な式の計算でも間に合う.

$$\mathbf{x}(k\Delta t) = \Phi_e(\Delta t) \cdot \mathbf{x}((k-1)\Delta t) + \mathbf{U}_e \cdot \mathbf{f}(k\Delta t) \quad (21)$$

$$\Phi_e(\Delta t) = \mathbf{E} + \Delta t \cdot \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{C} \quad (22)$$

$$\mathbf{U}_e = \Delta t \cdot \mathbf{M}^{-1} \quad (23)$$

しかしこれを単に計算するだけならシステムという全体的概念を必要としないが, 推移安定性の考察のためには, それが必要になってくる.

4. システムの濃縮

システムの次数  $n$  が非常に大きい場合は、近似的に濃縮して、次数を下げる事ができる。この方法は計算経済性の向上に役立つ。状態ベクトル  $x$  を定常的な意味での主の  $x_1$  と従の  $x_2$  に分ける。従ってコンダクタンス・マトリクスの内部もそれに応じて分割すれば (24) 式が成立し、この  $x_2$  に関する行により  $x_2$  は (25) 式のように表わされる。

$$\begin{bmatrix} {}_{11}C & {}_{12}C \\ {}_{21}C & {}_{22}C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$x_2 = -{}_{22}C^{-1} \cdot {}_{21}C \cdot x_1 = L \cdot x_1 \quad (25)$$

(25)式から  $x$  の近似  $\tilde{x}$  は次式のように表わされる。ここに  $E_1$  は  $x_1$  のサイズの単位マトリクスである。

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} E_1 \\ L \end{bmatrix} \cdot x_1 = S \cdot x_1 \quad (26)$$

近似状態方程式の重みつき残差積分を  $[0, T]$  時間区間で行ったものを 0 とおく。ただし重み関数は  $\tilde{x}$  にとる。

$$\int_0^T \tilde{x} \cdot (M \cdot \dot{\tilde{x}} - C \cdot \tilde{x} - f) dt = 0$$

$$\int_0^T x_1 \cdot ({}^tS \cdot M \cdot S \cdot \dot{x}_1 - {}^tS \cdot C \cdot S \cdot x_1 - {}^tS \cdot f) dt = 0 \quad (27)$$

これを恒等的に成立させるのは次式が成立する場合である。

$${}^tS \cdot M \cdot S \cdot x_1 = {}^tS \cdot C \cdot S \cdot x_1 + {}^tS \cdot f \quad (28)$$

これが濃縮された近似システムの状態方程式となる。このように濃縮はせずに、システムをいくつかのサブシステムに分割することにより次数を下げる方法については、線型サブシステムの連成理論として、さらにその他の理論は既研究[1]に詳しい。

5. 換気回路網の計算モデル

換気回路網は、基本的にはゾーンと流路の二つのモデル要素から構成される。例えば分岐するダクト系を持つとしても、分岐点にゾーンを仮定すれば、結局はこれらの二つのモデル要素に還元されてしまう。ただしこの一般化のためには、ゾーンの底面で持つ静圧は、動圧も加算された全圧と見なすモデル化の考え方を必要とする。従ってこうしたモデルを全圧節点系と呼ぶことにした。全体システムの数学モデルは、もし該当するとすれば、圧力仮定法をとった場合に行う繰り返し計算過程で、ステップ毎に構成される線形連立方程式系であろう。これは全圧のベクトルと、このベクトルに関するヤコビアン・マトリクスによる連立方程式系である。NETS ではこの方程式系を単純なアルゴリズムとデータ構造で構成するために、流路における風上側の全圧節点 (ゾーン) 番号と風下側のそれを内蔵する配列を定義し、風量収支の計算においては、然るべき全圧節点 (ゾーン) 番号にこれらの番号配列を介して間接アドレスすることにより、アルゴリズムを単純なものにしている。解法は大体かには圧力仮定法に属し、仮定した圧力をニュートンラプソン法で修正していくが、普通のニュートンラプソン法では振動を起こす仕組みを明らかにし、修正ニュートンラプソン法と呼ぶものを提案している。

まず換気回路網計算モデルにおいて、要となるのは各ゾーンでの風量収支の計算であるので、ここで用いられる主な変数や配列を表 1 に示す。

表 1 風量収支計算のデータ構造

大分類	内容	配列	size
モデルのサイズ	外気以外の総ゾーン数	$nv$	-
	総流路数	$m$	-
ゾーンの 情報	ゾーン底面の高さ	$l(i)$	$n+1$
	空気の密度	$\rho(i)$	
	ゾーン底面の静圧	$p(i)$	
	風量残差	$v(i)$	
ベクトル 流路の情報	流路の高さ	$h(k)$	$m$
	流路面積	$a(k)$	
	圧力損失係数	$\xi(k)$	
	圧力損失指数	$(k)$	
	風量	$q(k)$	
	i 側の風圧	$w_i(k)$	
	j 側の風圧	$w_j(k)$	
	風量 / 圧力の偏微分係数	$dqp(k)$	
	圧力損失の風量の 2 次式への回帰係数	$d1(k)$	
		$d2(k)$	
		$b0(k)$	
		$b1(k)$	
		$b2(k)$	
	$b3(k)$		
流路とゾーンの接続	流路の i 側のゾーン番号	$i(k)$	$m$
	流路の j 側のゾーン番号	$j(k)$	
流れの向き の情報	風上側ゾーン番号	$u(k)$	$m$
	風下側ゾーン番号	$d(k)$	

まず送風機を持たない流路の  $k$  番について  $i$  側からの圧力を  $p_i$ 、 $j$  側からの圧力を  $p_j$  と表せば次式で計算される。ここに  $g$  は重力加速度である。

$$p_i = p(\sigma_i(k)) - \{h(k) - l(\sigma_i(k))\} \cdot \rho(\sigma_i(k)) \cdot g + w_i(k) \quad (29)$$

$$p_j = p(\sigma_j(k)) - \{h(k) - l(\sigma_j(k))\} \cdot \rho(\sigma_j(k)) \cdot g + w_j(k) \quad (30)$$

$p_i$  と  $p_j$  の大小関係により風上側の圧力節点番号  $u(k)$  と風下側の  $d(k)$  が決定される。流路の差圧を  $p$  とすれば次式で計算される。

$$\Delta p = |p_i - p_j| \quad (31)$$

この  $p$  と圧力損失係数などから  $k$  番流路の風量  $q(k)$  は次式で計算される。

$$q(k) = a(k) \cdot \left( \frac{2 \cdot \Delta p}{\xi(k) \cdot \rho(\sigma_u(k))} \right)^{\frac{1}{n(k)}} \quad (32)$$

送風機を持つ流路については  $P - Q$  特性曲線が  $b0(k)$  から  $b3(k)$  を係数に持つ 3 次曲線で表されているからカルダノ等の解式を利用して  $q(k)$  について解くことができる。しかし一般に流路について圧力損失指数  $(k)$  は 2 ではないので、そのために  $q(k)$  の 2 次式に回帰しておく。

$$\xi(k) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left( \frac{q(k)}{a(k)} \right)^{n(k)} \equiv d_1(k) \cdot \left( \frac{q(k)}{a(k)} \right) + d_2(k) \cdot \left( \frac{q(k)}{a(k)} \right)^2 \quad (33)$$

送風機の加圧が i 側から j 側へ向けて行われる場合と、逆に j 側から行われる場合のそれぞれについて q(k)に関する3次方程式が記述され解くことができる。

$$p_i + b_0(k) + b_1(k) \cdot q(k) + b_2(k) \cdot q(k)^2 + b_3(k) \cdot q(k)^3 - p_j = d_1(k) \cdot \left( \frac{q(k)}{a(k)} \right) + d_2(k) \cdot \left( \frac{q(k)}{a(k)} \right)^2 \quad (34)$$

$$p_j + b_0(k) + b_1(k) \cdot q(k) + b_2(k) \cdot q(k)^2 + b_3(k) \cdot q(k)^3 - p_i = d_1(k) \cdot \left( \frac{q(k)}{a(k)} \right) + d_2(k) \cdot \left( \frac{q(k)}{a(k)} \right)^2 \quad (35)$$

風量 q(k)の根は複素数の範囲で3個あるが少なくとも1個は実数である。正の最大根を求める風量とする。この送風機付きの流路でも同様に風上側の節点番号 u(k)と風下側の節点番号 d(k)が求められる。各々のゾーンでの解法途上の風量残差 v(i)は次の簡単なアルゴリズムで計算できる。ここに := は代入を意味する。

ALGORITHM<1> Flow Balance	
Step	Description
1	For k := 1, 2, ..., m, do Steps 2-3
2	Set v(σ <sub>d</sub> (k)) := v(σ <sub>d</sub> (k)) + q(k)
3	Set v(σ <sub>u</sub> (k)) := v(σ <sub>u</sub> (k)) - q(k)
Comments: Flow imbalances are stored in vector v(i)	

以上のように節点番号を流路番号から間接的に得るためのベクトル v を利用し、アルゴリズムを単純にしていることを、節点番号の間接アドレッシング法と呼んでいる。

### 6. 圧力に関する非線形連立方程式の解法

仮定した圧力 p(i)に適切な修正量 p<sub>i</sub>を加えて風量残差を0にする。全てのゾーンの圧力は連成しているから、適切な修正量を求める方程式も強く連成したものをとる。いま v(i)は v<sub>i</sub> と、p(i)は p<sub>i</sub> と表示することにし、p<sub>1</sub> + Δp<sub>1</sub> から p<sub>n</sub> + Δp<sub>n</sub> でのテーラー展開の第一項までを記述すれば次のようになる。

$$v_i(p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_2, \dots, p_n + \Delta p_n) \approx v_i(p_1, p_2, \dots, p_n) + \frac{\partial v_i}{\partial p_1} \cdot \Delta p_1 + \frac{\partial v_i}{\partial p_2} \cdot \Delta p_2 + \dots + \frac{\partial v_i}{\partial p_n} \cdot \Delta p_n \quad (36)$$

この左辺が、圧力の修正をしたことにより丁度0になるとする。この式を i=1 から i=nv まで記述し、修正量のベクトル p<sub>c</sub> = t(p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>, ..., p<sub>nv</sub>)と風量の残差ベクトル v = t(v<sub>1</sub>, v<sub>2</sub>, ..., v<sub>nv</sub>) について整理すれば次式の様になる。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial v_1}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial v_1}{\partial p_{nv}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial v_i}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial v_i}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial v_i}{\partial p_{nv}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial v_{nv}}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial v_{nv}}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial v_{nv}}{\partial p_{nv}} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{p}_c = -\mathbf{v} \quad (37)$$

この左辺の i 行 j 列に v<sub>i</sub> / p<sub>j</sub> の偏導関数を含むマトリックスをヤコビアンマトリックスと呼ぶが J とおけば前式は次の様に表示される。

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{p}_c = -\mathbf{v} \quad (38)$$

実際に施す修正量 p<sub>c</sub>\* はこの式から求められた p<sub>c</sub> を半分にすることを修正ニュートンラプソン法と呼んでいる。

$$\mathbf{p}_c^* = -\left(\frac{1}{2}\right) \cdot \mathbf{J}^{-1} \cdot \mathbf{v} \quad (39)$$

### 7. ヤコビアンの作成

このマトリックスの (i, j) 要素はゾーン j の圧力増分に対応するゾーン i の風量残差の変化率である。この風量残差変化率は流出入する個々の風量の変化率の総和である。対角要素は自分自身の圧力が増加した場合であり、必ず流出が増える方向になるから個々の風量変化率も残差変化率も減少方向であり常に負である。一方、非対角要素は他のゾーンの圧力増加により、自分自身の残差は増加する変化をするから必ず風量変化率も残差変化率も正である。この符号の性質を利用し、偏導関数は絶対値を求めておいて、総和計算を行った後で符号を付ければよい。

風量の圧力による偏導関数は (29) から (31) 式を見れば分かるように p(k) によって微分しても p<sub>i</sub> によって微分しても絶対値を求める限り同じである。微分する式は (32) 式ではなく p について表示した式で風量により微分した後に逆数をとった方が簡単である。

$$\frac{\partial q}{\partial p} = \frac{2 \cdot a^\eta}{\eta \cdot \xi \cdot \rho} \cdot \left( \frac{1}{q^{\eta-1}} \right) \quad (40)$$

送風機が付いている流路の式は (34) と (35) であるが、p = |p<sub>i</sub> - p<sub>j</sub>| で整理し直すと次式となる。

$$\Delta p = d_1 \cdot \left( \frac{q}{a} \right) + d_2 \cdot \left( \frac{q}{a} \right)^2 - b_0 - b_1 \cdot q - b_2 \cdot q^2 - b_3 \cdot q^3 \quad (41)$$

この式から偏微分係数は次式で得られる。

$$\frac{\partial q}{\partial p} = \frac{1}{-3 \cdot b_3 \cdot q^2 + 2 \cdot \left( \frac{d_2}{a^2} - b_2 \right) \cdot q + \left( \frac{d_1}{a} - b_1 \right)} \quad (42)$$

流路毎の偏微分係数の絶対値を dq<sub>p</sub>(k)に入れておく。ヤコビアンを配列 RJ に列優先で作成するアルゴリズムは <2> のようになる。

前述した修正ニュートン・ラプソン法に加えて、初期値の取り方や倍精度の計算が必要である。さらに本論での解析微分による場合は、収束計算の開始時点で流路の両側の差圧が0になり(40)式での計算が不可能になる場合が起こる。この場合は例えば 10E-12 程度の十分に小さな p による風量 q を計算して用いれば良い。

### 8. 熱回路網と換気回路網の連成

熱と換気は相互影響を持っている。換気風量は熱を運ぶ。この熱回路網では伝導、表面伝達、放射、貫流、対流、移流の全ての伝熱形態を一種類のパラメータ、一般化熱コンダクタンス c<sub>ij</sub> で扱うので、汎用モデルであることが特徴である。仮に熱の j 節点から i 節点へ風量 q の流れがあって、空気の比熱を cp、密度を ρ とすれば一般化熱コンダクタンスは次式(43)で計算される。

$$c_{i,j} = c_p \cdot \rho \cdot q \quad (43)$$

#### ALGORITHM<2> *Jacobian Matrix*

##### Step Description

- 1 For  $k := 1, 2, \dots, m$ , do Steps 2-8
- 2 If  $\sigma_i(k) > nv$ , go to Step4
- 3 Set  $RJ(\sigma_i(k) + nv * (\sigma_i(k) - 1)) :=$   
 $RJ(\sigma_i(k) + nv * (\sigma_i(k) - 1)) - dq_p(k)$
- 4 If  $\sigma_j(k) > nv$ , go to Step6
- 5 Set  $RJ(\sigma_j(k) + nv * (\sigma_j(k) - 1)) :=$   
 $RJ(\sigma_j(k) + nv * (\sigma_j(k) - 1)) - dq_p(k)$
- 6 If  $\sigma_i(k) > nv$  or  $\sigma_j(k) > nv$ , go to Step1
- 7 Set  $RJ(\sigma_i(k) + nv * (\sigma_j(k) - 1)) :=$   
 $RJ(\sigma_i(k) + nv * (\sigma_j(k) - 1)) + dq_p(k)$
- 8 Set  $RJ(\sigma_j(k) + nv * (\sigma_i(k) - 1)) :=$   
 $RJ(\sigma_j(k) + nv * (\sigma_i(k) - 1)) + dq_p(k)$

Comments: Vector  $dq_p(k)$  stores partial derivatives  $q/p$  at flow paths. Jacobian matrix  $RJ$  elements are stored columnwise in an one dimensional vector.

従って換気の風量は次のアルゴリズム<3>で一般化熱コンダクタンスに加えられる。ここに  $vt(j)$  は換気回路網の節点番号  $j$  を熱回路網の節点番号に変換する。

#### ALGORITHM<3> *Generalized conductances including airflows*

##### Step Description

- 1 For  $k := 1, 2, \dots, m$ , do Steps 2-4
- 2  $i := \text{svt}(\text{sd}(k))$
- 3  $j := \text{svt}(\text{su}(k))$
- 4  $c(i + (n + no) * (j - 1)) := c(i + (n + no) * (j - 1)) +$   
 $c_p(\text{su}(k)) * \rho(\text{su}(k)) * q(k)$

Comments:  $\text{svt}$  is a vector transforms nodal number from airflow model to thermal model.  $c_{i,j}$  in matrix sized  $(n + no) ** 2$  are stored in columnwise.

逆に熱回路網の節点の温度により、次のアルゴリズム<4>で空気密度が決まり、換気回路網の駆動力となる。

#### ALGORITHM<4> *Air density effected by temperature*

##### Step Description

- 1 For  $i := 1, 2, \dots, nv + 1$ , do Steps 2
- 2  $\rho(i) := 353.2 / (273.2 + x(\text{svt}(i)))$

Comments:  $n$  is a total zone number excluding outdoor.  $x(j)$  is temperature of node  $(j)$  in thermal network model.

## 9. 変化する一般化熱コンダクタンス

熱伝導による一般化熱コンダクタンスは大きく変化するものではないが、放射に関するものは、両表面の温度に依存して大きく変化する。表面熱伝達も、温度差や風速によって変化すると見なさなければならない場合がある。こうした変化パラメータについては変化する度に推移行列等を計算しなおすことになる。

放射の一般化熱コンダクタンスについては、式(44)の放射の相対伝達率  $r$  を定義しておくことで、式(45)のように放射の一般化熱コンダクタンスが計算される。放射の両表面平均絶対温度  $x_m$  において線形近似化[3]して扱う。

$$\alpha_r = 0.04 \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_j \cdot c_b \cdot \left( x_m / 100 \right)^3 \quad (44)$$

ここに  $\alpha_r$  は放射率、 $c_b$  はステファンボルツマンの放射定数である。

$$c_{i,j} = \alpha_r \cdot s_j \cdot f_{j,i} = \alpha_r \cdot s_i \cdot f_{i,j} = c_{j,i} \quad (45)$$

形態係数に関する相反定理により、 $c_{ij}$  と  $c_{ji}$  は等しくなる。ここに  $f_{ji}$  は面  $j$  から面  $i$  を見る形態係数、 $s_j$  は面  $j$  の面積を表す。表面熱伝達での温度差依存や外気風速依存の扱いについては、何種類かの実験式が報告されているのでこれを用いることができる。

## 10. ガス流動モデル

ガスとは水蒸気や炭酸ガスや揮発性有機化合物質などを意味するが、大筋の数学モデルは熱回路網モデルと同様であり、熱回路網の計算サブルーチンを兼用している部分が多い。これは本来熱回路網が一般的な拡散系のモデルも記述しているからである。ただし水蒸気とその他のガスは、NETS 内部での処理が少し異なっている。水蒸気がガスとして計算されている場合には、相対湿度の計算や蒸発冷却効果の計算ができるようになっている。

熱、換気とガス流動の計算モデルの節点を集合論的に考えると、熱>ガス>換気、の包含関係が成り立つ。例えば建築躯体と室内空間から成り立つ系を考える。躯体は透湿性の材料と金属のような非透湿性の材料から成り立っているとす。金属材料中では、温度は存在するが、水蒸気やガスの移動媒体とは考えなくても良いから、対応するガスの節点はない。従ってガスの節点は、熱の節点よりも少なく、熱の節点に含まれると見なせる。室の空気を代表する節点には換気回路網の節点に対応する。しかし建築躯体中の熱や水蒸気の節点に対応する換気回路網の節点は考えなくてもよい。つまり換気回路網の節点は他の二つの節点の集合に包含され、最も小さい集合と考えることができる。

このことを別の表現をすれば、換気回路網の節点には必ず対応するガスと熱の節点が必要ならず、ガス流動回路網の節点には必ず熱回路網の節点が必要ならなければならない、ということになる。

NETS では節点番号の対応情報を持つベクトルを定義している。前述の  $vt(j)$  の様なベクトルがそれである。引数の  $j$  に換気回路網の節点番号を代入すれば  $vt(j)$  は熱回路網の節点番号を表す。

こうした三者のモデルの対応情報を基に、相対湿度や蒸発冷却の効果が計算できることになる。

## 11. 駆動条件

駆動条件とは、モデルを動かしていく条件のことであり、外気温変化や日射量変化のような気象条件によるものと、人為与条件と呼ぶ温度、発熱量、ガス濃度、ガス発生量などの他、モデル自体の構造的ないしはパラメータ的な変化も意味する。

これらの駆動条件はスケジュールで実施できる他、フィードバック制御によっても実行することができる。モデル自体の構造的・パラメータ的变化をモード変化と呼んでいる。例えば熱回路網では、一般化熱コンダクタンスのつながりが切れたり、値が変わったりすることであり、換気回路網では、開口面積や圧力損失係数が変化したり、送風機の回転数が変化したりというようなことを意味する。

モード変化は、モデル要素の全体集合において部分集合を幾つか定義した上で、それぞれにおいて独立して定義される。具体的には、部分とそれぞれの部分のモード番号によって管理される。ここに部分とは前述の部分集合のことであり、必ずしも空間的な部分を意味するものではない。スケジュールによる駆動条件制御は日バ

ターンという考え方で管理される。例えば平日と休日では日パターンが異なる。日パターンで定義できるのは、モード変化、システムパラメタの変化、人為与条件とフィードバック制御である。こうした条件の一日の変化パターンを日パターンと呼んで何通りか作っておく。そしてこれらの日パターンを、どの様な周期で実行していくかを定める表を日パターンの周期内で定義表として定義する。多くの場合に任意の周期ではなく、曜日毎に日パターンを定義する方が簡単であるから、この定義法を用いることもできる。

フィードバック制御則は、感知量から操作量までの手続きとして定義される。この操作量の一つとして前述のモード番号も含まれる。フィードバック制御則の実行日パターンも定義される。フィードバック制御の一つとしてPID制御も実行できる。PID制御の効用は、本シミュレーションでは実現象と異なり、感知量測定から制御操作の実施まで時間積分間隔の遅れがあることによる不都合を解消することと、操作量と制御量の関数関係が未知である場合に対処すること等である。ちなみに時間積分間隔は、最小1分から最大1時間までとることができる。一方気象データは一時間間隔なので、この間は線形補間される。

## 1.2. 熱負荷計算

NETSは、普通の熱負荷計算のように、室温や湿度の拘束による冷暖房状態の計算も可能である。この場合は未知数温度扱いの節点が既知数温度扱いの節点に変わる等の変化があるので、節点番号の改番とシステム状態方程式のサイズの変更などがNETS内で自動的に行われる。冷暖房時間帯設定は曜日に応じて任意のスケジュールで行うことができる。ユーザーは装置容量の上限・下限を定義できるが、もし負荷がこれらの制限を越えた場合には自然温湿度になる。また顕熱負荷が存在しない場合には潜熱負荷も存在せず自然湿度になる。

一方、PID制御のような状態フィードバック制御によって室温あるいはPMVを制御することもできる。これは操作量を加える節点と制御量とする節点異なる場合や、操作量から制御状態量までの関係が複雑な場合に用いられる。PID制御は事前計算として操作量の励振に対する制御量の応答、すなわち制御系の動特性の計算を行い、これをみてPIDの係数を定める。

以下に熱負荷計算の検証にあたって問われる事項とNETSの計算内容について述べる。

### 考慮する熱流の種類

#### 顕熱

##### 壁体貫流熱

NETSは壁の非正常伝熱モデルを有限体積法や有限要素法の任意の方法で作ることができる。典型的な壁はライブラリに登録しておいて全体モデルの中に引用し取り組むこともできる。壁は法線方向一次元伝熱モデルとする場合が多いが、湿気排出のための通気層を持つ多次元的な壁であってもモデル化は可能である。換気回路網との連成により煙突効果による通気層の換気も模擬できる。

##### 換気や漏気による輸送熱

この空気流動は、換気回路網との連成により未知数として解く事も、与条件値として与えることもできる。風量を与える場合には、結局一般化熱コンダクタンスにすることができる。また風量に乗るのは熱だけではなく水蒸気などの何らかのガスの流動も未知数として解く事ができる。

##### 日射吸収や夜間放射の扱い

日射吸収は最終的に熱回路網の節点の発熱として計算される。これに対し夜間放射は仮想温度天空と建物外表面の間の放射伝熱として計算される。つまり夜間放射は既知量としての発熱量で扱われるのではない。何故ならば夜間放射量は建物側の状況に依存した表面温度によって変化するものだからである。

日射量は直達と拡散から傾斜面の受熱量を計算するが、必要に応じて地表面反射率の影響を考慮することもできる。

窓ガラスに関する日射の計算は、遮蔽係数という固定的な仮定値を用いない。窓ガラスに関しては、一般に複層ガラスにおける入射角度依存の透過、吸収、反射を逐次計算し、まず吸収については各ガラスの吸熱量は対応する節点へ入力される。透過分については室内の任意の複数の節点へ分散して入力する。複層ガラス周りの熱回路網モデルを構成しておくことにより、ガラス温度も逐次計算されるので、ガラスから室内や外気へ対流伝達で流れる熱流も未知数として逐次計算される。こうして遮蔽係数は仮定せず、未知数として解く方法を用いている。

#### 家電製品や人体の発熱

NETSは汎用なので発熱に関し家電製品とか人体とかの区別はなく何であっても入力することができる。発熱はスケジュールでも状態フィードバックでも模擬することができる。スケジュールの場合には最小1分刻みの変動で与えることができる。また発熱量が温度に依存して変化することも模擬できる。発熱のスケジュールは1日のパターンを曜日によって変えることもできる。

#### 床壁等の熱容量の大きな物体の蓄熱

NETSは自由にモデル化できるので、こうした物体があれば、熱回路網のモデルとしてつくればよい。例えば室内に熱容量の大きな家具があったとすれば、その家具の熱回路網のモデルを作成し、全体モデルにつないで加えればよい。従って、通常は室の空気に家具類の熱容量を含ませることが行われるが、そうしたモデル化の制約は無い。

#### 潜熱

NETSでは水蒸気流動回路網を連成して解く事ができる。潜熱の原因となる水蒸気流動は多数ゾーン系でかつ躯体の透湿も考慮したモデルにおいてシミュレートされる。冷却コイル等何らかの除湿・結露が行われる水分量を計算し、凝縮熱を乗じて潜熱負荷とする。この計算は熱回路網の顕熱負荷計算と同様で、目標とする湿度に維持する潜熱負荷が計算される。装置容量を超えれば自然湿度となり、顕熱負荷が無いときには潜熱負荷も無い。

#### 換気や漏気によって運ばれる水蒸気

水蒸気流動回路網と換気回路網および熱回路網を連成し、水蒸気の流れを未知数として解くこともできるし、風量を与条件として水蒸気回路網と熱回路網だけを連成して計算することもできる。

#### 厨房器具や人体からの水蒸気発生

NETSは汎用なので水蒸気発生に関し厨房器具とか人体とかの区別はなく何であっても入力することができる。発生はスケジュールでも状態フィードバックでも模擬することができる。スケジュールの場合には最小1分刻みの変動で与えることができる。また発生量が温度に依存して変化することも模擬できる。発生のスケジュールは1日のパターンを曜日によって変えることもできる。

### 必須の計算条件

#### 暖冷房は断熱外壁に囲まれた建物内全室で行えること

NETSの熱回路網数学モデルは、従来モデルのように建築伝熱系を法線方向一次元伝熱の板状壁体と、これらによって構成される室空間からなるとする固定的な構造ではない。NETSは研究開発用のツールなのでモデル化の自由度を重要視しているからである。例えばそうした固定的モデルでは壁内通気を考慮することが困難になる。NETSのモデルの構造は型にはまっていないので、従来型のモデルでも多次元的なモデルでも任意に組むことができる。つまりNETSでは単室、多数室に関わらずモデルが作成でき、また一部の室だけ暖冷房し、他の室は自然状態にもできるし、全室暖冷房も任意に行なうことができる。どのようなモデルにするかは研究開発者の問題意識とどのような現象に重きを置いて検討するかによる。

**暖房期間は室温 18 以上に設定し終日暖房できること**

住宅であれば日射熱により室温が 18 を超えても冷房は行わないことが多いが、事務所建築では冷房を行う場合が多いであろう。NETS はどちらの条件の計算も行うことができる。これは季節に応じて定義できる冷房装置容量に、前者においては 0 を、後者は何らかの冷房能力を与えれば良い。NETS は一般にユーザーが定義した制御操作量の上限・下限を超えた場合には自然状態の計算を行う。なお NETS の計算モデルは固定的なものではないので、こうした温度制御は室空気に関わらず任意の節点に与えることができる。

**冷房期間は室温 27 以下で相対湿度 60% 以下に冷房する**

冷房期間であっても夜間の外気温度の低下等により室温が 27 を下回ることもあるであろう。こうした場合に暖房は行わないのが普通であるが、NETS も暖房装置容量を冷房期間において 0 にしておくことにより模擬することができる。湿度の制御については、再熱器等を持ち温度と湿度を独立して制御できる高級空調もあるが、家庭用のエアコン等であれば顕熱を除去している時には多くの場合に成り行きで除湿すなわち潜熱処理も行われてしまう場合が多い。NETS はどちらの湿度制御も行える。

**気象データは 5 年以上の平均値を使用すること**

NETS が用いる気象データは空気調和衛生工学会で開発された動的年間熱負荷計算用の標準気象データである。これは気温、湿度、法線面直達日射量、天空拡散日射量、風向、風速、雲量あるいは大気放射量等の 7 項目から成る 1 時間毎の 1 年間のデータである。NETS の計算時間間隔は最小 1 分から最大 60 分までで整数倍して 60 分になる数から任意に選べる。そこで 60 分より小さい時間間隔に関しては気象データは線形補間して用いられる。雲量または大気放射量は仮想天空温度に換算して用いられる。

**室内発生の顕熱と潜熱の与え方**

NETS では水蒸気移動回路網モデルも組んで、熱、換気モデルと連成して計算することができる。また熱回路網だけで計算することもできる。水蒸気回路網と連成して計算する場合には、潜熱として与えるのではなく水蒸気発生量として与える。顕熱は熱回路網の節点に、水蒸気発生量は水蒸気流動回路網の節点に与える。従ってこれらの節点が必要しも室空気を表すものではなく、室内の物体を表す節点であっても構わない。

**床下や小屋裏の影響**

非居住空間があればそれらも一種の室空間の様にしてモデル化できる。またこれらの空間の温湿度は未知数として扱うことができる。さらに空間を囲む内表面間の放射伝熱を考慮すべき時には放射伝熱を、モデル図を描くことで定義したり、これが煩雑な場合には内表面間のマトリックス表で定義することもできる。

**床下や土間床の影響**

床下空間も一種の室空間の様に扱い、床下換気を重視したい問題の場合には換気回路網モデルと連成する。土間床の影響を考慮すべき時には地盤を不易層まで離散化して建物モデルにつなぐ。不易層には年間平均気温を既知数として代入したり、計算期間が長い場合には断熱境界とすることもできる。

**壁体構成の考慮**

壁の法線方向 1 次元伝熱モデルは、有限要素法あるいは有限体積法で離散化し、部品としてライブラリに登録し、全体モデルの中に組み込むこともできるが、部品と全体とを区別せず全体モデルの中で作成することもできる。壁の外表面では日射の受熱に関する方位、傾斜角度、吸収率等の定義を行う。壁内の節点数をシステム濃縮の数学的な方法で減らして経済的なモデルにすることもできる。

外断熱等で通気層を持つ場合には壁の上下方向も含めた少なくとも 2 次元的なモデル化を行うことになる。また通気層の煙突効果を考慮するモデルを作る場合には換気回路網モデルも作成し、連成させる。

**窓周りの日射の影響**

様々な種類のガラスの入射角度依存の透過、反射率を入射角余弦の 6 次の冪級数回帰式としておき、複層ガラスの場合にはガラス間の無限回反射、吸収、透過を無限等比級数からそれぞれの吸収や透過および全体の透過を計算する。これは太陽位置が変化する毎時間ステップ毎に計算する。複層ガラスであってもガラスの温度を表す節点をそれぞれに設け、ガラス相互間、ガラスと室内表面、室内空気、外気やブラインド等との対流や放射の伝熱モデルを組んでおき、ガラス等から正味の対流伝達や放射伝達を計算する。窓透過日射は室内表面の任意の節点に分散して与えることができる。

庇等の日射遮蔽物は、標準熱負荷計算法での幾何的寸法の定義に則っており、袖壁や窓下の遮蔽も考慮する。

**外皮の漏気及び夜間放射**

隙間風をシミュレートする場合には換気回路網モデルも作成し、熱回路網と連成する。隙間風を表現するモデルには二通りの作成方法がある。

一つはサッシや開口などの隙間特性である圧力損失係数と指数を基に演繹的にモデルを作る方法である。本換気回路網モデルは汎用なので流路の数式表現は単純開口から隙間まで表している。例えば隙間の場合には流路面積  $a$  に対して隙間長さを適用し、代わりに大きな圧力損失係数を定義することになる。従って様々な隙間について単位長さ当たりの特性値が必要になる。

もう一つの隙間風モデルには気密測定結果から作成する方法がある。部位別の気密測定が成されていれば良いが、建物全体の隙間大きさが得られていない場合には、建物外皮に均等に割り振ることもある。この場合の流路断面積は当該流路で分担する外皮面積とし、その代わり大きな圧力損失係数を適用することになる。

隙間風を未知数として解かずと条件とする場合もある。この場合には熱回路網だけになり、与条件の隙間風量を一般化熱コンダクタンスとして与えることになる。

夜間放射は日射と異なり、熱回路網に対して発熱量的な与え方はしない。何故ならば建物外表面の温度に依存して変化するものだからである。利用できる気象要素は、雲量または大気放射量、さらに外気温度と湿度である。外気絶対湿度  $x_h$ 、外気絶対温度  $T_a$ 、雲量  $CC$  等から Brunt の式 [4] により (46) 式が記述でき、これを用いて (47) 式の仮想天空温度  $T_{sky}$  も定めることができる。また雲量ではなく大気放射量が  $R_n$  として与えられた場合には (48) 式で計算できる。

$$Br = 0.51 + 0.076 \sqrt{\frac{760 \cdot x_h}{0.622 + x_h}} \quad (46)$$

$$T_{sky} = T_a \cdot \left( \left( 1 - 0.62 \frac{CC}{10} \right) \cdot Br + 0.62 \frac{CC}{10} \right)^{1/4} \quad (47)$$

$$T_{sky} = \left( T_a^4 - \frac{R_n}{c_b} \right)^{1/4} \quad (48)$$

NETS で夜間放射を考慮する場合には、まず仮想天空温度の節点をモデル作成画面で配置し、これと建物外表面の各節点を放射の一般化熱コンダクタンスで結び、この放射熱コンダクタンスは両節点の平均絶対温度の 3 乗に関して線形化されているので、毎時間ステップで変化して計算される。

**機械換気による換気量の影響**

送風機による流れであっても風圧や煙突効果によって、全圧と風量の関係における運転点がずれることを考慮する。NETS の換気回路網モデルは、全圧節点系の考え方により、ダクトを持つ機械換気系が建築換気系と一緒にいても、ダクトの分岐点に仮想静圧ゾーンを設けて、結局全体系はゾーンと流路の集合としてモデル化できる。送風機は任意の流路に取り付けることができる。こうして機械換気だけでなく自然換気も含めて影響が考慮される。

### 13. ベンチマークテスト

建築学会での坂本, 宇田川等による委員会活動[5]により, 斯界の熱負荷計算プログラムを試験するための標準計算モデルが検討された。そして有志による様々な計算プログラムを用いたベンチマークテストが行われた。筆者も当時参加しようとしたが, 未だ熱負荷計算機能が十分ではなく断念した。しかしようやくこれらの機能も整い計算できるようになり, 結果をここに紹介したい。なお計算の条件については紙幅の関係で簡略に述べるが, 建築学会あるいは建築環境・省エネルギー機構からの資料が詳しいので参照されたい。

#### (a)概要

東京の標準気象データを用い, 木造およびコンクリート造の一戸建て住宅について, 仕様や条件の違いで次の6通りについて計算する。1. 木造: 標準条件(壁等はガラスウール100ミリ厚, 暖房設定温度は18 以上, 冷房設定温度は27 以下で60%以下とし, 全室24時間暖冷房), 2. 木造: 断熱仕様変更条件(壁等はガラスウール30ミリ厚), 3. 木造: 棟方位変更条件(標準条件の南面を西面に), 4. 木造: 日射遮蔽変更条件(標準で庇有りを無しに), 5. 木造: 冷暖房運転変更条件(標準で24時間暖冷房から間欠にし, 設定温度も強めに暖冷房し, 暖房温度は22 以上, 冷房温度を26 以下とする), 6. コンクリート造: 標準条件(壁等は発泡ポリスチレンフォーム35ミリ厚でその他は標準条件), である。

#### (b)暖冷房期間と条件

暖房期間は11月2日から4月22日, 冷房期間は4月23日から11月1日とし, 暖房期間では設定温度より上がっても冷房はせず, 冷房期間では設定温度より下がっても暖房はしない。冷房顕熱負荷が無いときには潜熱負荷も生じないものとする。

#### (c)建物モデル

一戸建て住宅総二階で延べ面積126m<sup>2</sup>, 1階はLDK室, 家族室(F室), 浴室等4室, 2階は主寝室, 子供室など5室がある。

#### (d)その他に与えられた条件

自然換気回数は室ごとに0.5回/時とする。1階の床下は直接外気に接しているものとする。各部位の熱橋は考慮しない。外壁の日射吸収率は0.8とする。地面の日射反射率は0とする。建物外表面と内表面の放射率は0.9とする。窓枠は無視し開口面積とガラス面積は等しいものとする。各種熱特性値は指定された値を用いる。

### (e)計算結果

建築学会委員会にて提案されている年間熱負荷計算結果の表示書式があるので, この書式に則って表2に示す。また計算結果の適合範囲の基準値があるので, これも表の右端に加える。表中の熱負荷は単位床面積当たりのものである。この検討からNETSによる結果は全て適合範囲に収まっていることが分かった。また適合範囲の中の偏りもあまり見られないようである。

### 14. 最後に

NETSの基礎的計算理論と特に熱負荷計算に関する方法も述べた。また熱負荷計算のベンチマークテストを行い検証した結果も紹介した。NETSでは熱流収支式や風量収支式の連立方程式をモデル図を描くことで自由に構成できる。そして連立方程式の構造はこのモデル図で直感的に理解でき, 全ての物性値とパラメータはモデル要素をクリックして定義確認することができるので, エキスパート向きの研究開発ツールである。この点でブラックボックスになりがちな他の計算プログラムとは異なる。またモデルの構造やパラメータをスケジュールやフィードバックで変化させられることも特徴である。今後はこうした特徴を活かした問題検討も紹介していきたい。

#### 【謝辞】

本論文を纏めるにあたり同僚の大西由哲氏にご尽力頂きました。また本計算理論の汎用性を活かした計算モデル作成の前処理プログラムと計算結果の後処理プログラム[2]は, 経済産業省の生活価値創造住宅開発プロジェクトにおいて開発することができました。

#### 【参考文献】

- [1] 奥山博康, "建築物の熱回路網モデルに関する理論的研究", 博士号学位論文, 1987年12月
- [2] Hiroyasu Okuyama, "Thermal and Airflow Network Simulation Program NETS", Proceedings of Sixth International IBPSA Conference (Building Simulation 99), Kyoto, pp1237-1244, September 1999
- [3] 木村建一著, "建築設備基礎理論演習", 学献社
- [4] 宇田川光弘著, "パソコンによる空気調和計算法", オーム社
- [5] 坂本雄三他, "熱負荷計算プログラムテスト方法(案)", 建築学会伝熱合同SWG資料, 2000年3月4日

表2 ベンチマーク熱負荷計算結果(東京標準気象データ)

単位: MJ/m<sup>2</sup>

計算条件	月積算値												年積算値	年積算暖・冷房合計	基準値					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			暖冷房	暖房				
1 暖房(顕熱)	55.9	52.7	38.5	12.7	0	0	0	0	0	0	16.3	41.7	217.8	302.1	280~360	200~270				
	0	0	0	0	0.5	5.5	18.4	23.4	10.5	0.5	0	0								
	0	0	0	0	0.5	7.5	26.6	34.2	14.9	0.5	0	0								
冷房	0	0	0	0	0	2.0	8.2	10.8	4.4	0	0	0	25.4							
	0	0	0	0	0.5	7.5	26.6	34.2	14.9	0.5	0	0	84.3							
	0	0	0	0	0.5	7.5	26.6	34.2	14.9	0.5	0	0	84.3							
2 暖房(顕熱)	110.5	102.9	77.8	28.3	0	0	0	0	0	0	38.5	85.4	443.4	558.7	500~580	395~465				
	0	0	0	0	1.3	8.7	28.8	36.8	16.1	1.4	0	0					93.1			
	0	0	0	0	0	1.8	7.2	9.2	3.8	0	0	0					22.1			
冷房	0	0	0	0	0	1.4	10.5	36.1	46.0	19.9	1.4	0	115.3							
	0	0	0	0	0	1.6	6.8	22.0	30.4	12.5	0.3	0	73.5							
	0	0	0	0	0	2.0	8.0	10.7	4.3	0	0	0	25.2							
3 暖房(顕熱)	60.6	55.1	37.3	11.5	0	0	0	0	0	0	17.8	45.7	228.0	326.7	290~370	200~270				
	0	0	0	0	1.6	6.8	22.0	30.4	12.5	0.3	0	0					73.5			
	0	0	0	0	0	2.0	8.0	10.7	4.3	0	0	0					25.2			
冷房	0	0	0	0	0	1.6	8.8	30.0	41.1	16.8	0.3	0	98.7							
	0	0	0	0	0.8	5.7	19.3	26.8	13.2	1.9	0	0	67.6							
	0	0	0	0	0.2	1.9	6.3	8.6	3.8	0.1	0	0	20.9							
4 暖房(顕熱)	54.9	50.8	36.2	12.3	0	0	0	0	0	0	16.1	41.2	211.4	300.0	280~360	185~255				
	0	0	0	0	0.8	5.7	19.3	26.8	13.2	1.9	0	0					67.6			
	0	0	0	0	0.2	1.9	6.3	8.6	3.8	0.1	0	0					20.9			
冷房	0	0	0	0	0.9	7.5	25.6	35.4	17.0	2.0	0	0	88.5							
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.7	32.3	173.0							
	0	0	0	0	0.9	6.2	16.3	20.0	10.1	0.9	0	0	54.3							
5 暖房(顕熱)	40.3	38.6	31.8	13.4	0	0	0	0	0	0	16.7	32.3	173.0	276.3	235~315	155~225				
	0	0	0	0	0.9	6.2	16.3	20.0	10.1	0.9	0	0					54.3			
	0	0	0	0	0.5	6.0	15.6	17.3	9.0	0.5	0	0					48.9			
冷房	0	0	0	0	1.5	12.2	31.9	37.3	19.2	1.3	0	0	103.3							
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18.4	51.8	267.6							
	0	0	0	0	0	0.8	14.6	23.0	8.1	0	0	0	46.6							
6 暖房(顕熱)	69.0	65.4	48.2	14.8	0	0	0	0	0	0	18.4	51.8	267.6	342.4	310~390	230~300				
	0	0	0	0	0	0.9	9.8	12.7	4.8	0	0	0					28.2			
	0	0	0	0	0	0.9	9.8	12.7	4.8	0	0	0					28.2			
冷房	0	0	0	0	0	1.7	24.4	35.7	12.9	0	0	0	74.8							
	0	0	0	0	0	0.9	9.8	12.7	4.8	0	0	0	28.2							
	0	0	0	0	0	1.7	24.4	35.7	12.9	0	0	0	74.8							