

## 熱と換気の回路網数値解析

奥山博康

### 1. 問題点の把握

大空間の熱的性状についての設計が難しいとされる原因は温度差による浮力に影響された空気の流れがどうなるかの予測計算を実用的にできないことにあるように思える。すなわち、この流れの運動方程式、連続方程式およびエネルギー方程式を差分法、有限要素法あるいは境界要素法で解こうとすることは正攻法でありながら、計算機の演算時間や容量の点で実用性に問題が残っている。

筆者もかつてはそのような計算法について研究したが、現在はよりマクロな換気計算を研究と開発の対象としている。換気計算は計算の最小単位が室であり、室と室、あるいは室と外気との空気の流れを解くものである。従って大空間のような1つの空間での細かい空気の流れを解くものではない。しかし、もしこの空間を仮想的にいくつかの室に区切って妥当な近似精度で換気計算が適用できるとすれば便利である。なぜなら換気計算は比較的計算経済性が良いからである。

こうした2種類の空気の流れについての解法を比較し、まとめれば表1のようになる。

次に温度分布の解法はいずれにせよ最終的に連立常微分方程式の解法に帰着される。ただし流体力学的な数値解析においては、この方程式の本数は膨大なものになるのが通例で、当然実行可能な解法も限られてくる。そしてこの実行可能な解法においては数値的安定条件が課せられ、これを外れた場合には発散などの問題を起こす。最も都合が悪いことはこの連立方程式の係数が空気の流

れによって一方的に定まるものであり、それゆえ安定条件を満たすための方策としては、計算時間間隔 $\Delta t$ を極力小さくすることくらいしかないことである。このことは非定常現象としてシミュレートしようとする際の1つの障害となっている。連立常微分方程式の各種の解法の比較を表2にまとめる。この中で時間積分法としてa, bについては非常に大きなマトリクス計算を必要とし、現在では流体力学的数値解析への適用は難しい。

最後に、換気計算における問題点をあげる。<sup>2)</sup>換気系の数学モデルはいずれにせよ、差圧と風量の非線形の関係から、非線型連立方程式系となる。従ってまず、この方程式系を一般的に組み上げるモデル化のアルゴリズムの問題があげられる。これを『換気系のモデリングの問題』と呼ぶことにする。次に方程式の解法の問題があげられる。その非線型性から、どのような解法をとろうとも繰り返し収束計算は不可避であるが、逐次解法であるがゆえに収束性が問題となってくる。モデルと条件によっては振動を起こし、解に到達しないことがある。これを『換気系の非線型連立方程式の解法上の問題』と呼ぶことにする。主な解法について表3にまとめる。

以上に述べた問題把握から、ここでは換気回路網と熱回路網について述べるが、前者の圧力に関する非線形連立方程式の解法としては修正ニュートンラプソン法を、また後者の時間積分法については主に後退差分について述べる。

表1. 流れの2種類の解法比較

解法	基礎式と前提		見方	未知数の 圧力の数	圧力についての方程式
流体力学的 数値解析	運動方程式 連続方程式	}	微視的	多い	線型連立方程式 (大次元)
換気計算	差圧と風量の関係式 風量収支の式				

表2. 温度分布を求めるための連立常微分方程式の各種の解法

大別	時間積分法	長 所	短 所
解析解	a 射影分解法	時間積分の厳密解。	固有値解析のマトリクス計算を必要とする。 非常に計算時間がかかる。
	b 後退差分法	無条件に安定。	逆行列のマトリクス計算を必要とする。 計算時間もかかる。
近似解	c 前進差分法	特にマトリクス計算は必要ない。 アルゴリズムも単純にできる。	条件付安定
	d bとcの混合型	bとcの長所をそれぞれ不完全ながら半々に持つ。 扱うマトリクスの次数が小さくてすむ。	bとcの単独に比べてプログラムがやや複雑になる。

表3. 換気非線型連立方程式の解法

解 法		特 徴	収束性
逐次線型近似化法		明確な線型システムとして記述できるが、逐次にこの方程式系を得るまでが複雑。	不明
クロス法	流量仮定法	閉回路を自動的に定めるアルゴリズムが必要。 通気路の多い建築換気系には不適當	あまり良くない
	圧力仮定法	建築換気系には適當	あまり良くない
ヤコビアンマトリクスを用いる ニュートンラプソン法		ヤコビアンマトリクスの作製と逆行列の計算に時間がかかる。	比較的よい

## 2. 熱回路網

大空間は壁、床、天井などの建築構成部材によって囲まれるから、これらの熱的影響を受ける。従って熱の移動現象としては大空間内だけではなく、これらの建築構成部材や床下の地盤も含めて考えなければならないことが多い。こうして考慮すべき計算領域は大きく複雑になってくる。しかし熱回路網モデルであれば比較的容易にこうした問題に対応可能である。<sup>4)</sup>

例えば大空間内での熱の移動はほとんど空気の流れによるもので占められるが、壁体内では伝導による熱流が主になる。こうした種々の伝熱形態を統一的に1つの拡張熱コンダクタンス  $c_{ij}$  でとらえる。

また集中定数系に近似するとき  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  のように空間座標に縛られて分割するのではなく、工学的な判断による巨視的な部分で分割する。例えば、壁体での熱流は法線方向だけ考慮すれば十分であるという工学的な

判断が成立すれば、壁面にそっての分割は必要なく、法線方向だけで済むことになる。こうした部分を検査体積と呼ぶことにする。検査体積の熱容量は中心点に集め節点とする。節点と節点の間の伝熱は定常過程と見なされる。

節点番号や  $c_{ij}$  の添字番号に約束ごとを設けることにより、熱回路網モデル全体での連立常微分方程式が一般的に組み上がるようにする。この方程式を状態方程式と呼ぶことにする。<sup>5)</sup>

室内の空気温度のように未知数として扱うものに対し、外気温のように既知数として扱うものもある。前者の節点番号は1から  $n$  番として前づめにし、後者は  $n+1$  から  $n+n_0$  番として後づめにする。 $i$  番と  $j$  番の節点間の熱コンダクタンスを  $c_{ij}$  で定義するが、特に空気の流れのように物質移動による熱流については方向性を持つことになる。 $j$  番節点で表わされる検査体積から、 $i$  番のそ

れに比熱  $c_p$ , 比重  $\gamma$ , 体積流量  $q$  で流れていれば,  $c_{ij}$  は  $c_p \cdot \gamma \cdot q$  であるが, 逆に  $c_{ji}$  は 0 となる。このことは差分法での風上差分に相当する。これ以外の伝導や伝達の伝熱形態については対称性を持ち  $c_{ij} = c_{ji}$  である。

また自由入力係数  $r_{ij}$  というのも定義する。例えば建物外表面での日射受熱量は東西南北上下の 6 方向の全日射成分にこの係数  $r_{ij}$  を乗じることによって計算できる。 $j$  番目の全日射成分を  $g_j$  とし, これから外表面を受け持つ  $i$  番節点へ受熱する割合が  $r_{ij}$  である。こうした  $g_j$  が一般に  $n_g$  個あるとする。

さらに  $i$  番節点の熱容量は  $m_{ii}$  とする。一般に  $m_{ij}$  で記述するが, 差分法や検査体積法などの集中定数化法においては,  $i \neq j$  であれば常に  $m_{ij} = 0$  である。ただし有限要素法などで離散化した場合には  $i \neq j$  についても非 0 である。

以上により  $l$  から  $n$  番の任意の  $i$  番節点において次の熱平衡式が成立する。これを一般化節点方程式と呼ぶことにする。

$$\sum_{j=1}^{n+n_0} m_{ij} \dot{x}_j = \sum_{j=1}^{n+n_0} c_{ij} (x_j - x_i) + \sum_{j=1}^{n_g} r_{ij} \cdot g_j \quad (1)$$

ここに  $x_i$  などは  $i$  番節点の温度であり,  $\dot{\phantom{x}}$  は時間微分を表わす。この節点方程式において大切なことは, 全ての節点は他の全ての節点と結びついているとして定式化していることである。物理的な空間次元などにより実際には結びついていない場合でも, それは 0 の  $c_{ij}$  で結びついているものと見なす。こうした定式化法を回路網の定式化法と呼ぶことにする。

状態方程式は, 状態ベクトル  $x$  を  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 既定温度から構成される既定入力ベクトル  $x_0$  を  $(x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+n_0})$ , そして自由入力量から構成されるベクトル  $g$  を  $(g_1, g_2, \dots, g_{n_g})$  と定義するとき次式のように表わされる。

$$M \cdot \dot{x} = C \cdot x + C_0 \cdot x_0 + R \cdot g \quad (2)$$

$m_{ij}$ ,  $c_{ij}$ ,  $r_{ij}$  の 3 種類の係数を, システムの状態方程式を構成するものとして, まとめてシステムパラメータと呼ぶことにする。今までのシステムパラメータについての添字の定義から, (2) 式のマトリクスの中味は数学上のマトリクス要素記法にほぼ一致した簡単なものになっている。

(2) の状態方程式は時間微分方程式であるから時間積分することによってシミュレーションが行われる。

従来はこの時間積分は差分で行われてきた。しかし場合によっては解析的に行うことも可能である。従ってモデル化とシミュレーションを合せて普通は差分法と呼ぶ場合が多いが, 空間に関する差分なのか時間に関する差

分なのかを明確に区別する必要がある。流体力学的数値解析において行われるエネルギー方程式の差分化の場合でも (2) 式の形でとらえることは可能である。ただしこの場合は方程式を具体的に構成するために, 回路網の定式化法のような何らかの方法が必要である。有限要素法でエネルギー方程式を離散化する場合でも (2) 式と似ている全体の有限要素式と呼ばれるものが構成される。ただし有限要素法の教科書では  $C_0$  や  $R$  のマトリクスの構成についてはあまり述べられないので注意を要する。以上のことから, 各種の集中定数化あるいは離散化の方法を統一し互換性や接続性をもたせることができる。すなわち, システムパラメータを共通言語のようなものとしてこれが実現できる。<sup>5)</sup>

さて 1 の問題点の把握で述べたように, 温度の節点数が多い場合には計算時間がかかたりして実用的ではないが, 時間積分の射影分解による解析解は次のように記述される。<sup>1)</sup>

$$x(t) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{\alpha_i t} x(0) + \int_0^t \sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{\alpha_i(t-\tau)} (C_0^* x_0(\tau) + R^* g(\tau)) d\tau \quad (3)$$

ここに  $\alpha_i$  は  $M^{-1} \cdot C$  の固有値,  $P_i$  は射影子,  $C_0^*$  と  $R^*$  はそれぞれ  $C_0$ ,  $R$  の左方から  $M^{-1}$  を乗じた定数マトリクスである。(3) 式をもとにいくつかの漸化式の形式を持つ時間積分公式を導くことができる。<sup>6)</sup>

これに対して流体力学的数値解析においては前進差分 (forward time step) が用いられることが多い。これは次のように記述される。

$$x(k\Delta t) = (E + \Delta t \cdot C^*) x((k-1)\Delta t) + \Delta t \cdot C_0^* x_0((k-1)\Delta t) + \Delta t \cdot R^* g((k-1)\Delta t) \quad (4)$$

ここに  $k$  は時刻添字を表わし, 時間間隔は  $\Delta t$  である。 $C^*$  は  $C$  の左方から  $M^{-1}$  を乗じたものである。空間差分法では  $M$  は対角マトリクスであるから  $M^{-1}$  および  $C^*$  を得ることは容易である。すなわち逆行列計算などをする必要はない。

これに対して後退差分は逆行列の計算を必要とする。この計算は次の漸化式で計算される。

$$x(k\Delta t) = (M/\Delta t - C)^{-1} M/\Delta t \cdot x((k-1)\Delta t) + (M/\Delta t - C)^{-1} (C_0 \cdot x_0(k\Delta t) + R \cdot g(k\Delta t)) \quad (5)$$

このとき  $C^*$  を用いて記述すればより簡単な形にすることはできるが, 1 つの便利さを失うことになる。(5) 式の形で扱えば, 定常計算をしたいときには  $M$  を 0 マトリクスにしてやればよいが,  $C^*$  を用いた式ではそれができないからである。

### 3. 換気回路網

#### 3.1 数値モデル

以下に述べる換気回路網の考え方により総合的な換気モデルをつくることができる。例えばエアダクトによる冷暖房装置を含めたモデル化もできるし、大空間だけでなく付属の室や廊下も含めた全体的なモデルをつくることできる。特に機械換気については大空間とダクト内の温度差による浮力の効果により送風機特性曲線上で運転点を実際はどこになるかなどのシミュレートも可能となる。ダクトや送風機まで含めてモデル化できるのは全圧で扱うからである。従来よりダクト系の設計においては全圧で扱うことの便利さが良く知られているが、これを建物系まで拡張するものである。

換気回路網は全圧節点系として定義する。どのような換気系であっても底面に全圧節点を持つ室(セル)と、室と室あるいは室と外気を結ぶ、点に集中定数化された通路の集りを見なせることになる。具体例を図1に示す。モデル化の手順は次のようである。i) 全体を室(セル)に分割する。建築的な仕切による室はもちろん、1つの室内で著しく温度が異なると思われるときはモデル上の分割をする。ダクトの分岐点にもモデル上の室を設ける。ii) 通路の集中定数化を行う。上下方向に長い開口はいくつかに分割し、それぞれの高さの中心に集中定数化する。エアダクトについては出口あるいは分岐点のところを高さと見なす。iii) 圧力節点についてのデータをつくる。各室の底面での全圧を節点値と見なす。圧力節点に番号をつける。外気は最後の番号にする。節点の高さを得る。iv) 通路についてのデータをつくる。任意に*i*側、*j*側の定義をする。*i*側、*j*側の節点の番号を得る。通路の高さを得る。通気抵抗と指数を得る。送風機は通路の属性として定義するが全圧の風量による関係式の係数を得る。

換気の数値モデルは節点圧力に関する非線形連立方程式系としてとらえられる。熱系のように単純な線形方程式系では表現できない。この解法として圧力仮定法をとる。これは仮定された圧力によって各室での風量残差を計算し、これを0にするように修正量を施していくものである。こうした計算を汎用性をもちながらも単純なアルゴリズムで行えるようにデータ構造に工夫をする。最も重要な計算過程は仮定された節点圧力から風量残差を求めるところである。このためのデータ構造を表4に示す。

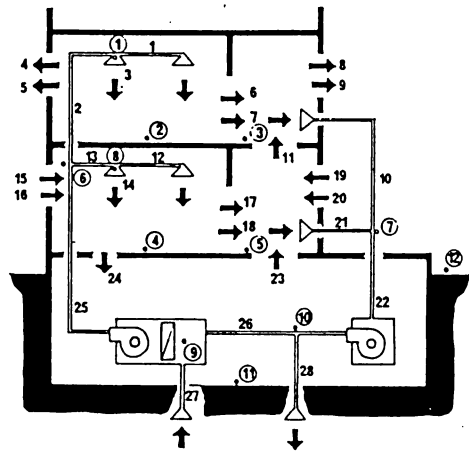
送風機をもたない通路*k*番について、*i*側からかかる静圧を  $p_i$ 、*j*側からのそれを  $p_j$  とすれば、それぞれ次式で計算される。

$$P_i = P(\sigma_i(R)) - \{R(R) - L(\sigma_i(R))\} \cdot \gamma(\sigma_i(R)) + W_i(R) \quad (6)$$

$$P_j = P(\sigma_j(R)) - \{R(R) - L(\sigma_j(R))\} \cdot \gamma(\sigma_j(R)) + W_j(R) \quad (7)$$

$p_i$  と  $p_j$  の大小関係により風上側になる節点番号  $\sigma_u(k)$ 、風下側になる  $\sigma_d(k)$  が決定される。また通気抵抗に関する諸情報  $a(k)$ 、 $\zeta(k)$ 、 $\eta(k)$  などから通過風量  $q(k)$  も求まる。

送風機を持つ通路については、送風機特性曲線が  $b_0(k)$ 、 $b_1(k)$ 、 $b_2(k)$ 、 $b_3(k)$  を係数を持つ3次曲線で表わされているから、解析的に  $q(k)$  について解くために、通気抵抗としての差圧の風量による関係式も  $q(k)$  についての1次と2次の和として表わす必要がある。これらの1次と2次の係数が  $d_1(k)$  と  $d_2(k)$  である。送風機加圧が*i*側から行われる場合と*j*側から行われる場合についてそれぞれ次の  $q(k)$  に関する3次方程式が成り立つ。



上図の建物を下図の様にモデル化する

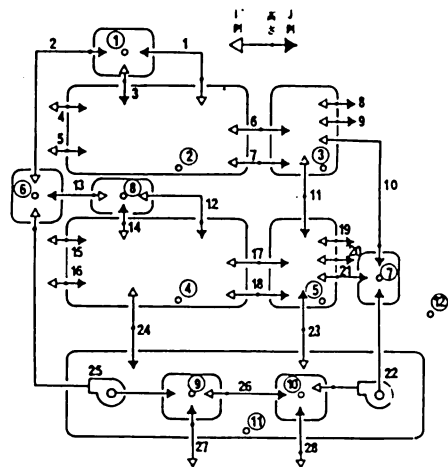


図1. 換気系のモデル化の方法

$$P_i + b_0(R) + b_1(R) \cdot g(R) + b_2(R) \cdot g(R)^2 + b_3(R) \cdot g(R)^3 - P_j = d_1(R) \cdot g(R) + d_2(R) \cdot g(R)^2 \quad (8)$$

$$P_j + b_0(R) + b_1(R) \cdot g(R) + b_2(R) \cdot g(R)^2 + b_3(R) \cdot g(R)^3 - P_i = d_1(R) \cdot g(R) + d_2(R) \cdot g(R)^2 \quad (9)$$

この3次方程式はカルダノなどの方法によって解析的に解ける。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。逆流状態でなければ正の最大根が求める風量となる。このとき風上側、風下側の節点番号  $\sigma u(k)$ ,  $\sigma d(k)$  もそれぞれ定められる。

i番の室での風量残差を  $v(i)$  とすればすべての室の風量残差は次のアルゴリズムで計算される。ただし  $m$  を総通路数とする。

$$\left. \begin{aligned} & k=1, 2, \dots, m \text{ について} \\ & U(\sigma d(k)) \leftarrow U(\sigma d(k)) + g(k) \\ & U(\sigma u(k)) \leftarrow U(\sigma u(k)) - g(k) \end{aligned} \right\} \text{を計算する} \quad (10)$$

ここに  $\leftarrow$  は代入を意味する。以上のように数値モデルは数式的に明確なものとはならない。この原因は風量の向きによって風量残差の方程式が異なってしまうことと差圧と風量の非線形性にある。

表4. 風量残差計算のデータ構造

	内 容	記列名	サイズ		
スカラ	総室数	n	-		
	総通路数	m	-		
ベクトル	室(セル)の情報	床の高さ (m)	l (1)	n + 1	
		空気の比重 (kg/m <sup>3</sup> )	r (1)		
		室内圧 (kg重/m <sup>2</sup> )	p (1)		
		風量残差 (m <sup>3</sup> /sec)	v (1)		n
	通路の情報	通路の高さ (m)	h (k)	m	
		通路の面積 (m <sup>2</sup> )	a (k)		
		抵抗係数	z (k)		
		抵抗指数	w (k)		
		風量 (m <sup>3</sup> /sec)	q (k)		
		外気風圧・I側 (kg重/m <sup>2</sup> )	wI (k)		
		外気風圧・J側 (kg重/m <sup>2</sup> )	wJ (k)		
		抵抗の回帰係数	d <sub>1</sub> (k)		
			d <sub>2</sub> (k)		
			送風機性能係数		b <sub>0</sub> (k)
		b <sub>1</sub> (k)			
		b <sub>2</sub> (k)			
		b <sub>3</sub> (k)			
通路と室(セル)の接続情報	通路のi側の室番号	σ i (k)			
	通路のj側の室番号	σ j (k)			
流れの向き情報	風上側室番号	σ u (k)			
	風下側室番号	σ d (k)			

### 3.2 換気モデルの非線形方程式の解法

総室数は  $n$  として、風量残差  $v(i)$ , ( $i=1, 2, \dots, n$ ) を、節点全圧 (室内圧)  $p(i)$ , ( $i=1, 2, \dots, n$ ) に適当な修正量  $\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n$  を施して、全て0に近づける。いま、 $v(i)$  は  $v_i$ ,  $p(i)$  は  $p_i$  のように表示することにし、仮定の圧力  $p_1, p_2, \dots, p_n$  に対して  $\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n$  の修正量を施せば全ての残差が0になるとする。このとき  $p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_2, \dots, p_n + \Delta p_n$  の点での  $v_i$  のテーラー展開第1項までを記述すれば次のようになる。

$$\begin{aligned} & U_i(p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_2, \dots, p_n + \Delta p_n) \\ & \cong U_i(p_1, p_2, \dots, p_n) + \frac{\partial U_i}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial U_i}{\partial p_2} \Delta p_2 + \dots + \frac{\partial U_i}{\partial p_n} \Delta p_n \end{aligned} \quad (11)$$

これを  $i=1, 2, \dots, n$  について記述し、修正量ベクトル  $p_c = (\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n)$  と風量残差ベクトル  $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$  について整理する。

$$J \cdot p_c = -v \quad (12)$$

J はヤコビアンマトリクスと呼ばれるものでその  $i$  行  $j$  列要素は  $d v_i / d p_j$  である。  $p_c$  を単に仮定圧力ベクトル  $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  に加えていくのは普通の多次元的なニュートンラプソン法である。ところが、これでは解の振動などを起こし収束しない場合があることが数多くの経験からわかっている。そこで、このような問題を起こさない修正ニュートンラプソン法を示す。この方法は圧力修正量の加え方と、その他いくつかのささいな方法の複合であるが、このうちのいずれかでも欠如すれば解が収束しない事態が起りえる。すなわち換気計算は非常に微妙な計算である。

(a) <圧力修正量の加え方：振動防止係数を乗じる。>

(12)式から計算される修正量  $p_c$  をそのまま施してはならない。振動防止係数  $\epsilon = 0.5$  を乗じてから施す。この理由は換気非線形方程式が持つ独特の性質にある。図2の上部には単室で2つの通路を持つ最も単純な要素モデルを示す。そして室内外は同じ空気比重で、通路に風圧も作用していないときに、室内圧  $p$  に対する風量残差  $v$  のグラフがどうなるかを下部に示す。  $p=0$  の自明の解をはさみ両側の  $v$  の関数は異なる。重要な性質は  $p$  の解の左側では  $v$  の曲線が上に凸で、右側では下に凸であること、  $v$  は常に減少曲線であること、さらに  $p$  の解の近傍では傾きが垂直に近づくことである。こうした性質はこの特別な条件でなくても一般に保たれることが示される。ただしこの特別な条件の場合のように  $p=0$  をはさんでの完全な対称性は多少損なわれることに

なると推測される。とにかくこの特別な条件と $\eta=2$ の場合においてはどの仮定値 $p_0$ からはじめてもニュートンラプソン法は完全な振動を繰り返す。しかし一般の場合でも $v$ の曲線の全体的な様相は同様であるから、やはり振動しやすいといえる。以上のことから振動防止係数の必要性和その値の意味が直感的に説明された。

すなわち非線型方程式の優れた解法であるニュートンラプソン法も適用する問題の性質に応じた修正が必要になる場合もあるということである。

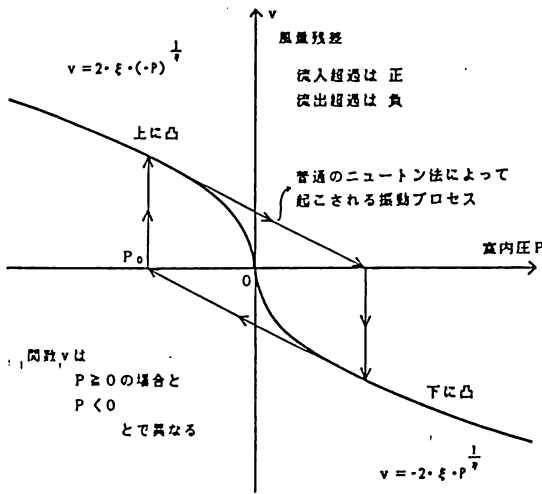
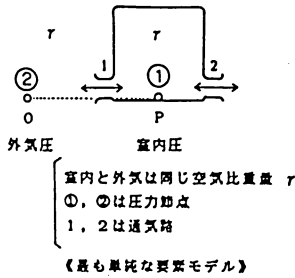


図2. 普通のニュートンラプソン法が振動を起こすしくみ

(b) <ヤコビアンをつくり方：中央差分>

偏導関数  $d v_i / d p_j$  は数値微分によって求める。 $v$  は風量の向きによって切り換わる関数であるから解析微分で求めようとするのは適当ではない。この数値微分は中央差分で行う必要がある。このことも図2から直感的に説明される。つまり解の近傍では曲線の傾きが垂直に近づき変化が激しいからである。

$$\frac{\partial v_i}{\partial p_j} \approx \frac{v_i(p_1, \dots, p_j + \Delta p, \dots, p_n) - v_i(p_1, \dots, p_j - \Delta p, \dots, p_n)}{2 \cdot \Delta p} \quad (13)$$

(c) <初期値のとり方：換気駆動力0からの開始>

ニュートンラプソン法において初期仮定値は解の近くなければならない。換気系の物理的考察から、この条件を満たすであろう状態が考えられる。それは全室が外気温に等く、風圧も0、そして送風機も停止している状態である。仮に何らかの換気駆動力が作用しても圧力の値としては近いであろう。換気駆動力0の初期値は次式で計算される。(i=1,2,...,n)

$$p(i) = p(n+1) - \gamma(n+1) \cdot l(i) \quad (14)$$

(d) 以上の解法上の工夫のほか、計算は倍精度で行うことが望ましいようである。これは実際の物理的現象を考えてもわかるように空気は非常に微小な圧力差でも流れるからである。

4. 換気系と熱系の連成

換気風量は室内外の温度差に影響される。逆に室温は換気風量に影響される。こうしたことを換気系と熱系は相互影響を持つと表現することにする。またシミュレーションとしては連成させると表現することにする。

換気モデルは空気比重を入力とし、風量を出力とする。一方、熱系は風量を入力とし、空気比重を出力とする。即ち互いに一方の出力はもう一方の入力になっている関係にある。両者の系が線形システムで記述できていれば、こうした相互関係を考慮した全体の線形システムが記述できる。しかし換気系は本質的に非線形性を持つからそれが困難である。換気系を逐次的に線形近似化することも不可能ではないが、逐次であるがゆえの複雑さが残る。

ここでは単に両者の系を交互に繰り返して計算していく過程によってこの連成を実現することにする。もし定常状態を求めようとする場合には繰り返し計算過程において温度あるいは風量がほとんど変化しなくなった状態をもって解とする。また非定常状態を求めようとするときには $\Delta t$ の時間間隔の遅れを許して、一方の出力をもう一方の入力として時間軸方向の計算を進めていく。

熱系は温度の節点系で、換気系は全圧の節点系である。両者の節点を持つ物理量は異なっているが、各々の室においては両者の節点は1対1に対応する。しかし固体中の熱伝導を表わす節点に対応する換気系の節点はない。こうした様子を描いたのが図3である。

このような両系の節点番号の対応をとる関数を定義する。すなわち、 $i$ が換気系の節点番号とするととき $\sigma v t(i)$ は熱系の節点番号とする。この様子を図4に示す。

この対応関数を用いて、換気風量による拡張熱コンダクタンスを計算することができる。

$$\left[ \begin{array}{l} k=1, 2, \dots, m \text{ について} \\ i \leftarrow \sigma_{vt}(\sigma_d(k)), j \leftarrow \sigma_{vt}(\sigma_u(k)) \quad (15) \\ C_{ij} \leftarrow C_{ij} + 3600 \cdot c_p \cdot \gamma \cdot \rho(k) \end{array} \right.$$

ここに  $c_p, \gamma$  はそれぞれ空気の比熱, 比重である。逆に熱系からの出力である温度は空気比重に換算されて換気系へ与えられる。これはゲイ・リュサックの法則を用いて、次のように計算される。

$$\left[ \begin{array}{l} i=1, 2, \dots, n \text{ について} \\ \gamma(i) \leftarrow 353.2 / (273.2 + X(\sigma_{vt}(i))) \quad (16) \end{array} \right.$$

以上のようにして両系のつながりがとれ、相互影響がシミュレートできる。

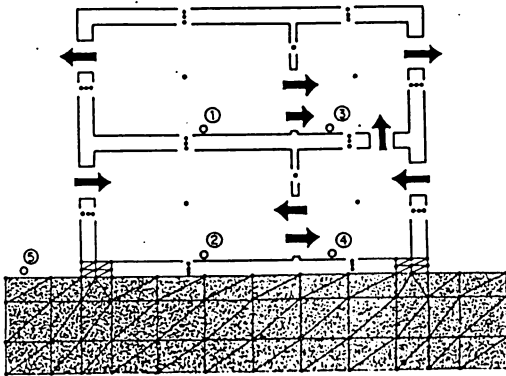


図3. 熱系と換気系の連成

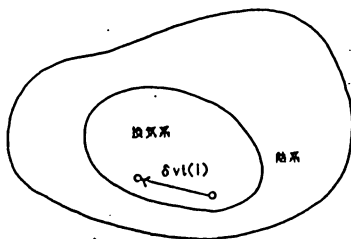


図4. 熱系と換気系の節点の包含関係

### 5. 適用例

大空間についての適用例は少ないので、多層多室の事務所建築の自然換気計算に適用した例を示す。大空間を仮想的に区切った場合の通気抵抗は窓やドア開口の通気抵抗に比べてかなり小さいと考えられるが、仮にベルマウス状の抵抗(抵抗係数1程度)にとった場合の例については既に報じてある。<sup>4)</sup>

建物は地上約31mの高さで8階建てである。地階は1階だけであるが南側に外気に面した窓がある。建物の平面的な大きさは東西方向62m、南北方向68mである。この建物の最も大きな特徴は上部が外気に開放された大きな中庭を持つことである。一般階の事務スペースは南側と北側にある。また南北面は大部分窓となっているが、東西面は比較的窓の面積が少ない。中庭に面する南北面もやはり大きな窓面積を持つ。

計算の主目的は中間期における自然通風の状況予測である。この場合は大部分の冷暖房装置は停止され、自然室温状態となる。従って換気風量や室温に影響をあたえるのは外気の風向風速、日射量および内部発熱である。このようなことから熱と換気の連成シミュレーションを行う。ただし定常計算である。気象条件は秋季設計値(外気24.4°C, 直達762Kcal/m<sup>2</sup>・h, 天空58Kcal/m<sup>2</sup>・h)である。

換気回路網のモデルは全部で78個の全圧節点と281本の通路を、熱回路網は149個の節点を持つものとした。

窓やドアの通気抵抗は設計資料にあるものを用いたが、風圧係数は比較的に不確かなため風洞実験によって得た。計算結果の一例として上げたのは北風3m/sで窓は全開にした状態である。全開といっても引違いなので窓面積の半分が有効開口となる。南北断面の風量分布は図5に示す。4階部分の風量分布は図6に示す。この場合の建物全体での換気回数は約10回/時であった。

空気の流れは中庭に集り上に抜けていく傾向を持つ。この傾向はどのような風向や風速であっても変ることはなかった。風洞実験によって中庭の周壁の風圧係数が風向きによらず常に負になる特性を持つことがわかっていく。従って煙突効果との相乗効果から、このような形状の建物は自然換気に適しているといえよう。

### 6. 今後の課題

大空間の温度分布を計算するためには、温度そのものに影響された空気の流れも計算する必要がある。このために換気計算を適用するとすれば解決しなければならない問題がある。

まず大空間を計算モデルとしていくつか区切った場合、これらの区切りのところでの適当な通気抵抗の与え方が不明確なことである。もちろんこの抵抗は空気の粘性から生じるものであるから、抵抗は定数的なものではなく、その区切りのまわりの流れの状況によって変化するものとするのが本来は正しいであろう。

またこの換気系は本質的に全圧の計算である。従って空調の吹き出し口からの噴流が大空間内にどのように分布するかなどの計算は困難である。この場合も通気抵抗に適当な値を与えれば、ある程度は近似できるであろうが、ゆったりした流れの場合よりかなり困難と思われる。

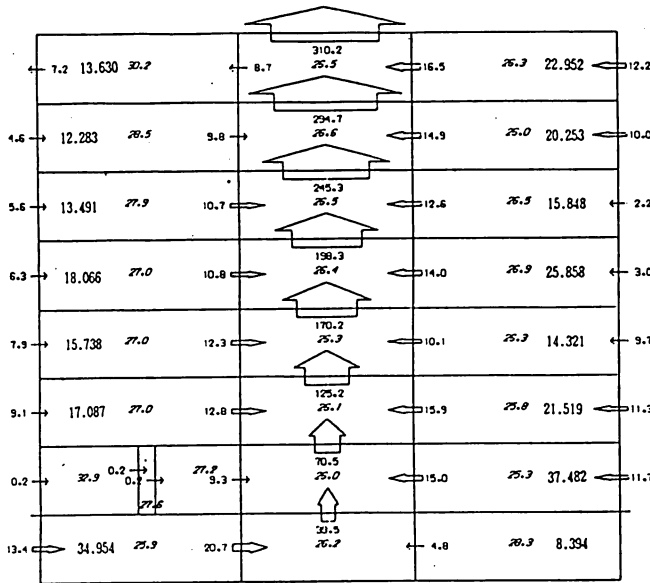
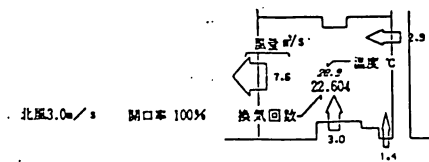


図5. 風量分布・南北断面西向き

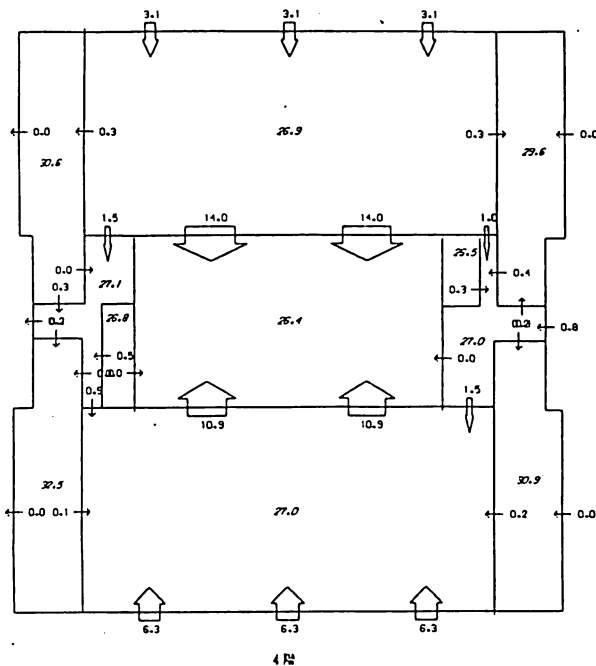


図6. 風量分布・4階

以上、換気計算を大空間内の流れに適用する場合の問題は通気抵抗のとり方に集約される。そしてこの解決法は、実験による経験則を見出すか、流体力学的な数値解析によって補完するかのいずれかであろう。

## 7. まとめ

熱回路網と換気回路網のマクロなモデルで大空間の熱的性状の予測計算をする場合の可能性について考えた。流体力学的な数値解析に比べ、比較的溫度節点や壓力節点数が少なくできるため、計算時間も短くてすみ、また数値的に発散や振動を起こさない安定な解法がとれるので実用的である。さらに大空間内だけでなく建築部材中の伝熱も含めたモデルや、空調ダクト系まで含んだモデルをつくれるために総合的なモデル化が可能である。

しかし換気計算は本質的に全圧計算であり気流分布の予測計算に用いるのは本来は適切ではない。もしこのマクロモデルの長所を生かすために、こうした不適切さを許容できる近似精度で克服しようとするなら、適当な通気抵抗を得るための何らかの実験的经验則か数値解析モデルが必要である。

## <参考文献>

- 1) 奥山博康, 木村建一: 『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数値積分公式』日本建築学会論文報告集, Vol. 269, 1978年7月, P. 127
- 2) 奥山博康: 『換気回路網によるシミュレーションの理論と応用』空気調和衛生工学会学術論文集, 1983年10月, P545
- 3) 奥山博康: 『熱回路網によるシミュレーションの理論と応用』空気調和衛生工学会学術論文集, 1983年10月, P541
- 4) 奥山博康, 藤井晴行: 『回路網モデルによる建築環境シミュレーションプログラムの開発(その1: プログラム体系と適用事例)』空気調和衛生工学会学術論文集, 1985年9月, P213
- 5) 奥山博康: 『熱回路網の概念による各種の集中定数化法の統一』空気調和衛生工学会学術論文集, 1986年10月, P277
- 6) 奥山博康: 『一般拡散システムの回路網による状態方程式とそのシステムパラメータの同定理論』日本建築学会論文報告集, Vol. 344, 1984年10月, P. 103

清水建設(株) 技術研究所・研究員・工務