



Title	多数室相互換気量測定システムと同定アルゴリズム
Author(s)	横山, 真太郎; 落藤, 澄; 角田, 直人 他
Description	第3回衛生工学シンポジウム (平成7年11月9日 (木) -10日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 3 モデリング、情報管理 . 3-4
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 3, 157-162
Issue Date	1995-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7901
Type	departmental bulletin paper
File Information	3-3-4_p157-162.pdf



3-4 多数室相互換気量測定システムと同定アルゴリズム

横山真太郎 落藤 澄 ○角田直人 中村真人 (北海道大学)
渡辺 一弘 (新菱冷熱工業) D. T. Grimsrud (U of M MnBRC)

1. はじめに

省エネルギーを考慮にいたした室内空気質の制御計画が世界的な規模で求められている。その際、汚染発生量の予測とともに、建物全体の換気量ならびに多室間相互換気量の定量は制御計画の基本事項といえる。換気量の定量化については、これまで比較的多くの報告がなされている。最新の方法の1つはスーパーコンピュータによる数値シミュレーションであろう。しかし、現段階では、比較的高速な吹出し気流をもつクリーンルームなどの単一空間の解析には有効な手段と考えられるが、ドアや窓周辺の微小隙間あるいは壁体内クラックが主流となす多室間相互換気量の定量にいたるまでには、多くの未解決の事項が存在する。一方、実務的な立場からすると、多室間相互換気量の定量法としてトレーサガス法が多用されている。この方法の精度向上に対し、国内外を問わず多くの努力が払われている。本報では、室内空気質の多元計測と併用可能な多室間相互換気量の測定システムの改良とトレーサガスのデータから多室間相互換気量を同定する際の実務的アルゴリズムとその応用例について報告する。

2. 多数室換気量測定システムの概要

室内空気質の多元計測と併用可能な多室間相互換気量の測定システムを開発した。概要を図1に示した。特に、このシステム中において、重要ユニットである多点ガス発生・採取装置を試作した。試作するにあたっては、濃度測定機器としてマルチガスモニタ計の使用を念頭に、手動・自動制御のモードで使用可能で、かつ携帯に便利でフィールドワークの効率を高めるものであることを目的とした。

システムの主要構成は、1)マイクロコンピュータ、2)多点デジタル入出力装置、3)多点ガス発生・採取装置、4)マルチガスモニタ計(ガス分析計)、5)プリンタ、6)トレーサガスポンペ。その他の主要付属品としては、a)発生用・採取用チューブ、b)吹出し・吸込みディフューザー、c)スタンド、d)混合用ファン、e)混合用ファン制御用リレースイッチがあげられる。

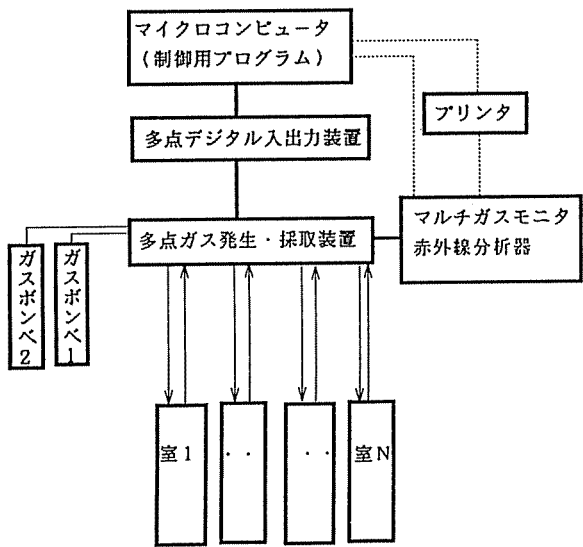


図1 システムの測定機器・制御機器の構成

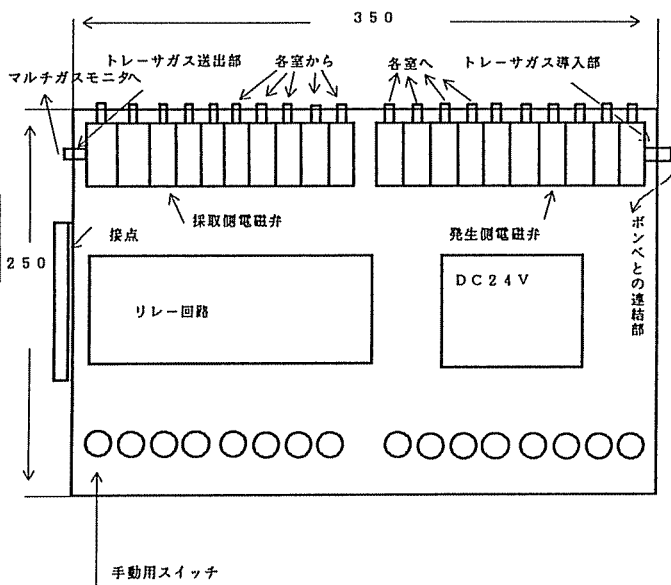


図2 多点ガス発生・採取装置

多点デジタル入出力装置には、入力32chと出力24chが実装されている。マイクロコンピュータとの通信は、RS-232Cケーブルを介して行われる。

多点ガス発生・採取装置は、本システムのために自作したもので、自動制御モードではコンピュータと多点デジタル入出力装置により制御され、各室に確実にトレーサガスを発生・採取する装置である。制御方法には、自動制御の他に、手動制御が行えるように設計した。図2にその概要を示す。多点ガス発生・採取装置の構成は、イ)本体ボディ、ロ)トレーサガス導入部、ハ)トレーサガス送出部、ニ)発生側電磁弁、ホ)採取側電磁弁、ヘ)リレー回路、ト)リレー回路及び電磁弁用電源、チ)手動用スイッチ、リ)手動・自動制御切り替え接点からなる。

尚、本装置の主要な仕様は以下のとおりである。(1)電源：AC100V；50/60Hz。(2)寸法；350W x 250D x 110H。(3)重量：5Kg。(4)設置法：卓上型。

3. トレーサガス法による多数室換気量の同定

3.1 室内空気質問題における基礎方程式

トレーサガスを含めた物質濃度平衡式を考える。主要な前提条件として、1)各ゾーンにおいて物質は瞬時一様拡散、2)外気圧は測定期間中一定、3)物質発生は空気密度を変化させない、を仮定する。

物理量の各記号と単位は以下の通りである。

t: 時間 [s]。 C_i : ゾーン*i*における物質の容積濃度 [m^3/m^3]。 V_i : ゾーン*i*の容積 [m^3]。 m_i : ゾーン*i*における物質の発生率 [m^3/s]。 Q_{ij} : ゾーン*j*からゾーン*i*への空気の移動量 [m^3/s]。 λ : 物質の崩壊定数 [1/s]。 ξ : 空気浄化装置の物質漏洩率 [-]; ただし、物質が完全捕集される場合は $\xi=0$ 、完全漏洩の場合は $\xi=1$ 。 γ : 物質の壁体等への沈着率 [1/s]。 また、 $i=0,1,2,3\dots N$; $j=0,1,2,3\dots N$, N : ゾーン総数、ゾーン0は外気とする。

また、 δ_{ij} は Kronecker delta 規約を表す。

汚染物質やトレーサガスを含む物質濃度平衡式は式(3.1)のようになる。

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = m_i + \xi \left(\sum_{j=0}^N \{Q_{ji} C_j (1 - \delta_{ij})\} \right) - \left(\lambda V_i + \sum_{j=0}^N \{Q_{ij} (1 - \delta_{ij})\} + \gamma V_i \right) C_i \quad (3.1)$$

3.2 トレーサガス法における基礎方程式

トレーサガスには、通常、 SF_6 、 CO_2 、 CO 、 N_2O 、 C_2H_6 等が選ばれる。すなわち、それらのガスは、 $\gamma \doteq 0$ 、 $\lambda \doteq 0$ 、 $\xi \doteq 1$ と考えられる。その場合、式(3.1)は式(3.2)のように簡単化される。

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = m_i + \left(\sum_{j=0}^N \{Q_{ji} C_j (1 - \delta_{ij})\} \right) - \left(\sum_{j=0}^N \{Q_{ij} (1 - \delta_{ij})\} \right) C_i \quad (3.2)$$

各ゾーン*i*において、空気の総流入量と総流出量は等しく、その量を S_i とおくと、式(3.3)が得られる。

$$\dot{S}_i = \sum_{j=0}^N Q_{ji} (1 - \delta_{ij}) = \sum_{j=0}^N Q_{ij} (1 - \delta_{ij}) \quad (3.3)$$

ここで、式(3.2)のマトリクス表示式を考えるため、以下の成分をもつベクトル $\{K\}$ 、マト

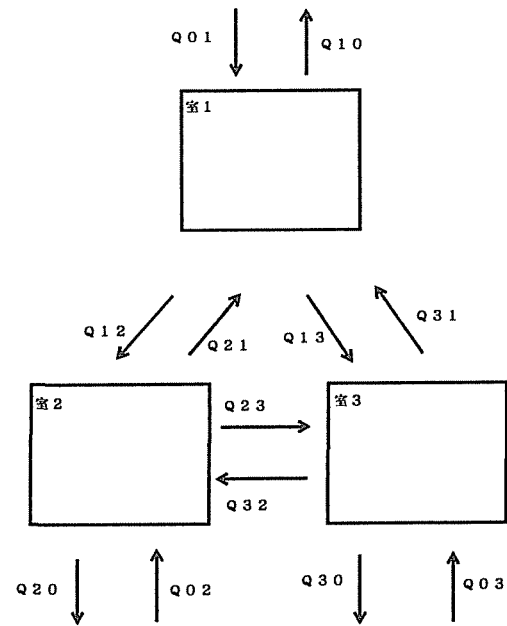


図3 3ゾーン問題の模式図

リクス [Q] とベクトル {C} を導入する。

$$\{K\} = V_i \frac{dC_i}{dt} - m_i \quad (3.4) \quad [Q] = Q_{ji}(1 - \delta_{ij}) - S_i \delta_{ij} \quad (3.5)$$

$$\{C\} = C_j \quad (3.6) \quad \{K\} = [Q] \{C\} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \frac{dC_1}{dt} - m_1 \\ V_2 \frac{dC_2}{dt} - m_2 \\ V_3 \frac{dC_3}{dt} - m_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{01} & -S_1 & Q_{21} & Q_{31} & \cdots \\ Q_{02} & Q_{12} & -S_2 & Q_{32} & \cdots \\ Q_{03} & Q_{13} & Q_{23} & -S_3 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

式(3.8)における V_i 、 dC_i/dt 、 C_i 、 C_j および M_i は既知量または測定可能量である。未知量は $Q_{ij}(i \neq j)$ で、その総数は $\{(N^2 - N) + 2N\} = N(N+1) = (N+N^2)$ である。すなわち、 $Q_{ij}(i \neq j)$ を同定するために、少なくとも $(N+N^2)$ 組の方程式が必要である。

それに対して、式(3.3)から、 N 組の方程式が得られ、他の N^2 組の方程式は式(3.8)から全体が特異行列を構成しないよう選択する。

トレーサーガス法は具体的手法から、いくつかに分類されている。トレーサーガスの種類によって、(a)シングルガス法と(b)マルチガス法に分けられ、ガスの発生の仕方から(1)減衰法、(2)一定注入法、(3)パルス注入法、(4)一定濃度法に分けられるのが、通例である。

紙面の都合上、各方法の説明は割愛し、基礎方程式に関連した結論のみ述べる。

減衰法では、測定中に $m_i=0$ なので、式(3.4)は式(3.9)となる。

$$\{K\} = V_i \frac{dC_i}{dt} \quad (3.9)$$

一方、一定注入法の定常状態では、式(3.4)は式(3.10)に書き換えられる。

$$\{K\} = -m_i \quad (3.10)$$

また、一定濃度法における濃度を C を、 $C=C_i - C_0$ とおけば、式(3.6)は式(3.11)になる。

$$m_i = Q_{0i}C = Q_{0i}(C_i - C_0) \quad (3.11)$$

いま、図3に模式的に示されている3ゾーンの問題を例に、ベクトル x と f およびマトリクス E を以下のように定義する。

$$x = (Q_{01}, Q_{02}, Q_{03}, Q_{10}, Q_{20}, Q_{30}, Q_{12}, Q_{13}, Q_{21}, Q_{31}, Q_{23}, Q_{32})^T \quad (3.12)$$

$$f = (0, 0, 0, V_1 dC_1/dt_1 - M_1, V_2 dC_2/dt_1 - M_2, V_3 dC_3/dt_1 - M_3, V_1 dC_1/dt_1 - M_1, V_2 dC_2/dt_1 - M_2, V_3 dC_3/dt_1 - M_3)^T \quad (3.13)$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ C_0 & 0 & 0 & -C_1 & 0 & 0 & -C_1 & -C_1 & C_2 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & C_0 & 0 & 0 & -C_2 & 0 & C_1 & 0 & -C_2 & 0 & -C_2 & C_3 \\ 0 & 0 & C_0 & 0 & 0 & -C_3 & 0 & C_1 & 0 & -C_3 & C_2 & -C_3 \\ C_0 & 0 & 0 & -C_1 & 0 & 0 & -C_1 & -C_1 & C_2 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & C_0 & 0 & 0 & -C_2 & 0 & C_1 & 0 & -C_2 & 0 & -C_2 & C_3 \\ 0 & 0 & C_0 & 0 & 0 & -C_3 & 0 & C_1 & 0 & -C_3 & C_2 & -C_3 \\ C_0 & 0 & 0 & -C_1 & 0 & 0 & -C_1 & -C_1 & C_2 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & C_0 & 0 & 0 & -C_2 & 0 & C_1 & 0 & -C_2 & 0 & -C_2 & C_3 \\ 0 & 0 & C_0 & 0 & 0 & -C_3 & 0 & C_1 & 0 & -C_3 & C_2 & -C_3 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

多数室相互換気量 Q_{ij} を同定するための連立一次方程式は、式(3.15)となる。

$$E x = f \quad (3.15)$$

式(3.15)で、ベクトル x が求める解ベクトルであり、その成分は $N(N+1)$ の Q_{ij} からなる。また、ベクトル f において、最初の N 成分は 0 の値をとるが、これは式(3.3)に由来するためである。それ以降の N^2 成分はそれぞれに値をもつ。

4. 多数室相互換気量の実用的同定アルゴリズム

トレーサーガス法の多数室相互換気量の計算法についての1つの画期的な方法は、Penman and Rashid (1982)や Perera, Walker and Oglesby (1983) がとった方法であろう。多数室相互換気量を式(3.15)から直接同定しようとする、しばしば、 $Q_{ij} < 0$ という値が算出される。 $N(N+1)$ の Q_{ij} に1つでも負値が算出されると、その物理的意味からいって、 $N(N+1)$ 全体の信頼性を大幅に損ねる。それを解消する方法として、彼らは Lawson and Hanson (1974) の非負制約条件付き最小二乗解法のアルゴリズム (NNLS) を採用した。NNLSは後述する WNNLS の特殊ケース (ω が単位マトリクス) に相当し、その概要は表2のとおりである。ただし、 $m = N(N+1) + N_a$ 、 $N_a \geq 0$ の整数、 $n = N(N+1)$ である。

日本でも NNLS に準拠したとする報告が散見される。Lawson and Hanson (1974) によれば、NNLS は不等式制約条件付き線形計画問題を双対変数を導入して、解く方法ともいえる。

トレーサーガス法の具体的手順を考えると、先述した基礎方程式の前提条件の成立、測定誤差など多くの要因が影響し、多数室になればなるほど、式(3.8)から精度の高い Q_{ij} すなわち $N(N+1)$ の非負の Q_{ij} が同定される可能性は極めて低くなる。そのことは、さらにいえば、無視しえない誤差をかかえたまま、NNLS を用いて、たとえ非負の値を得たとしても、それらは実体とかけ離れた値である可能性が高い。

それらの誤差要因の影響を出来る限り少なくする実務的手段として、1) データクリーニング (Data Cleaning) の導入と 2) 重み付き非負最小二乗法 (Weighted Non-Negative Least Squares ; WNNLS) の採用を考えた。これらの手法の原初形態は Yokoyama, Namioka and Ogata (1982) にみられる。Data Cleaning のアルゴリズムを表1に、WNNLS のアルゴリズムを表2にまとめた。

これらの一連の手法で、「 $m = N(N+1) + N_a$ 、 $N_a \geq 0$ の整数」の取り方については、様々なことが考えられる。著者らの多用する減衰法についていえば、現段階の1つの

表1 Data Cleaning のアルゴリズム

- [1] Proposal of data cleaning procedure and assigning procedure of weighting factor
 - 1) Obtain m kinds of data sets of $V_i, dC_i/dt, C_i, C_j$ and M_i .
 $m = N + R(N \times N) \geq N(N+1)$.
 - 2) Define weighting factor vector ω .
 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N, \omega_{N+1}, \omega_{N+2}, \dots, \omega_{2N}, \dots, \omega_n)^T$
 - 3) Set $\omega := 0$ (ω_L ; $L=1, 2, \dots, m$)
 - 4) Fix N components of $I=0$. Adding N ($I=1$ to N) $\times N$ ($J=1$ to N) components among combination of $R\{K=1$ to $R\} \times N$ ($\{K=1$ to $N\}$, solve Q_{ij} ($i \neq j$).
If all Q_{ij} s are non-negative, each ω_L of component used for simultaneous equation add +1 point. The ω_L ($L=1, 2, \dots, N$) of $I=0$ have full score points.
 - 5) Repeat Step 4) procedure to all combinations among m kind data components.
We define that the value of ω_L is the weighting factor of the corresponding component.
 - 6) Calculate Q_{ij} ($i \neq j$) using the modified NNLS method with weighting factor. This program name is the Weighted Non Negative Least Square (WNNLS).
- Step 4) and 5) have a role of data cleaning for ($R \times N \times N$) components.

表2 重み付き非負最小二乗法 (WNNLS)

Algorithm WNNLS($E, m, n, f, x, \omega, w, z, P, Z$)

- | Step | Description |
|------|--|
| 1 | Set $P := \text{NULL}$, $Z := \{1, 2, \dots, n\}$, and $x := 0$. |
| 2 | Compute the n -vector $w := (\omega E)^T (f - \omega Ex)$. |
| 3 | If the set Z is empty or if $w_j \leq 0$ for all $j \in Z$, go to Step 12. |
| 4 | Find an index $r \in Z$ such that $w_r = \max\{w_j : j \in Z\}$. |
| 5 | Move the index r from set Z to set P . |
| 6 | Let E_p denote the $m \times n$ matrix defined by
$\text{Column } j \text{ of } E_p := \begin{cases} \text{column } j \text{ of } E & \text{if } j \in P \\ 0 & \text{if } j \in Z \end{cases}$ |
| | Compute the n -vector z as a solution of the least squares problem $E_p x \sim f$. Note that only the components $z_j, j \in P$, are determined by this problem. Define $z_j := 0$ for $j \in Z$. |
| 7 | If $z_j > 0$ for all $j \in P$, set $x := z$ and go to Step 2. |
| 8 | Find an index $q \in P$ such that $x_q / (x_q - z_q) = \min\{x_j / (x_j - z_j) : z_j \leq 0 \text{ for all } j \in P\}$. |
| 9 | Set $\alpha := x_q / (x_q - z_q)$. |
| 10 | Set $x := x + \alpha (z - x)$. |
| 11 | Move from set P to set Z all indices $j \in P$ for which $x_j = 0$.
Go to Step 6. |
| 12 | Comment: The computation is completed. |

やり方は、 $Na=N^2$, $2N^2$, $3N^2$, ---, kN^2 とstep-wise的にすなわち段階的に式(3.8)群のデータを増加させ、Data Cleaningサブルーチンにかける。ある時点で、非負の $N(N+1)$ の Q_{ij} が仮測定されたら、WNNLSルーチンにすすみ、 Q_{ij} を同定する。その選択の仕方としては、減衰法の経験的誤差解析の報告を基に、 $k=0$: 40%減衰時点近傍、 $k=1$: 50%減衰時点近傍、 $k=2$: 30%減衰時点近傍、 $k=4$: 60%減衰時点近傍、---を提案する。

5. 多数室換気量測定システムの応用

多数室間相互換気量の測定システムを活用して、これまで、日本と米国、正確に言えば、北海道とMinnesota州において、大学ならびに一般住宅を対象にいくつかの現場測定を行ってきた。ここでは、紙面の都合上、日本の北海道の大学施設で行った結果について報告する。

北海道大学工学部A棟6階暗室に対して12月初旬の二日間、多数室換気量測定システムの応用を試みた。対象を3ゾーン(室)モデルとし、3室の相互換気量の定量と、その定量した結果との比較のために、3室の内部のドアを開放にして1室とみなし、換気回数の算定を行った。また、参考のために、室温、外気温、A棟6階廊下気温の連続測定と換気口・通気口での簡易風速測定を行った。

対象室の概要を図4に示す。対象室は、RC造6階建ての6階部分に存在する。対象ゾーンの総容積は約 50m^3 で、暗室として設計されたため、3室とも無窓空間となっている。室①、室③と通路部分間のドアを開放し、室①と通路部分の間のドアを閉鎖することによって3室(ゾーン)問題として考えた。尚、室①、②、③の容積は、それぞれ 13.5 、 24.4 、 $12.1[\text{m}^3]$ である。

使用した測定機器の概要は前節に述べられているが、具体的手順を中心に以下補足説明を加える。測定システム本体は図4にみられるようにA棟6階廊下に設置した。そこから、各室へ発生用・採取用チューブを誘導し、吹き出し・吸込みディューザーを装着の後、各部屋はぼ中央、高さ約 1.5m に固定した。トレーサーガスの瞬時一様拡散状態に近づけるため、測定期間中、混合ファンを作動させたが、ファン作動の相互換気量への影響も考慮し、低速で運転した。トレーサーガスには SF_6 のみを使用し、濃度制御は減衰法によった。濃度測定機器としてマルチガスモニタ計を用い、サンプリング時間を2分間隔とした。

二日間の測定を通して外気温約 0°C 、A棟6階廊下気温約 17°C 、室温は3室とも16

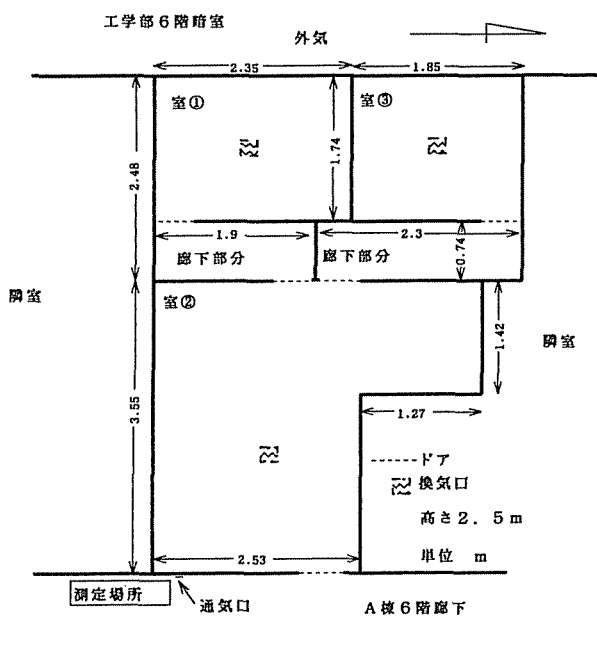


図4 北海道大学工学部A棟6階暗室

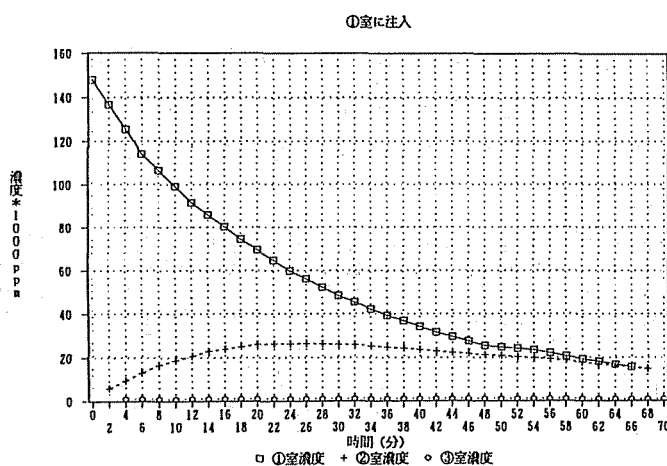


図5 トレーサーガス SF_6 の記録例

—17°Cでほぼ一定であった。熱線風速計による換気口近傍の気流速の簡易測定結果は、室①で平均0.80、室②は平均0.03、室③は平均0.15[m/s]であった。また、通風口での外向き気流速は約0.44[m/s]であった。

相対的に室①の換気口と通風口を通しての換気量が大きいことを示唆する結果であった。

図5にトレーサガスSF₆の時間変化を示す。前節の同定アルゴリズムに従って作成したプログラムによって、計算した。ちなみに今回の測定値が、Data Cleaning サブルーチンを経た段階での重み係数 ω の最大値は4であった。最終同定結果を図6に

まとめた。なお、図6では相互換気量の概要を把握しやすいように、1[m³/h]以下の微少な値は一括した*印で表した。図6の結果は、熱線風速計による簡易測定によって定性的に示唆された、換気経路の外気～室①～室②～A棟6階廊下が卓越性を定量的に示している。

一方、室①②③に同時にトレーサガスを供給し、3点から同時に採取した混合空気による暗室全体の換気回数の測定を別個に行った。その結果は、1.01[回/h]であった。それに対して、図3に示した相互換気量から、3室全体の換気回数を求めると1.04[回/h]となり、両者は非常に近い値となった。このことは、本測定システムは、今回のように測定期間中の環境条件が安定していれば、相互換気量の定量に非常に有効なものと考えられた。

尚、室①と室③は、配置、用途ともに、対称なものとなっているので、測定前に同様な換気量になると予想されたが、同定結果は異なっていた。そこで、事後調査をしたところ、設備換気器具が異なり、その性能の違いが反映したものと考えられたことを付記する。

6. おわりに

室内空気質の多元計測と併用可能な多室間相互換気量の測定システムの改良とトレーサガスのデータから多室間相互換気量を同定する際の実務的アルゴリズムについて報告した。数理的な側面の厳密性については改良の余地があるが、実務的アルゴリズムは著者らの長年にわたる測定と誤差発生要因についての経験と考察に基づくもので、その意味では有用なものと考えられる。開発した多数室間相互換気量の測定システムの応用に関して、北海道の大学建物内の3ゾーンモデルについて述べた。尚、この研究の一部は、Fujita Research, USAの研究助成によった。

<参考文献> 1) Breum (1993): Indoor Air, Suppl., No.1, 1-23. 2) 絵内・荒谷・Shaw (1993): 空気調和・衛生工学会論文集, No.51, 15-27. 3) Grimsrud, Sherman, Diamond, Condan and Rosenfield (1979): ASHRAE Transactions, 85(1), 851-865. 4) IEA Energy Conservation in Building & Community Systems Programme (1991): Technical Note AIVC 34 Air Flow Patterns within Buildings Measurement Techniques. AIVC, Coventry, Great Britain. 5) Lawson and Hanson (1974): Solving Least Squares Problems. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 6) 植崎・漢・山中・樋口(1988): 空気調和・衛生工学会論文集, No.41, 31-38. 7) 落藤(1982): 多数室における換気計算と測定法に関する研究. 科学研究費研究成果報告書. 北海道大学. 8) Okuyama (1993): Proceedings the International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, Univ. Tokyo, ASHRAE, Atlanta, 351-356. 9) Penman and Rashid (1982): Building and Environment, 17(4), 253-256. 10) Perera, Walker and Oglesby (1983): Proceedings 4th AIC Conference on Air Infiltration Reduction in Existing Buildings, Switzerland. 11) Yokoyama, Namioka and Ogata (1982): Bull. Fac. Engineering, Hokkaido University, No.107, 13-22. 12) Yokoyama and Ochifuji (1987): Indoor Air '87, 2, 430-436. 13) Yokoyama and Ochifuji (1990): Indoor Air '90, 4, 151-156. 14) Yokoyama and Ochifuji (1990): Indoor Air '90, 4, 151-156. 15) 横山・落藤・持田(1990): 空気調和・衛生工学, 64(11), 915-920. 16) 吉野・松本・内海(1988): 空気調和・衛生工学, 62(2), 1-8.

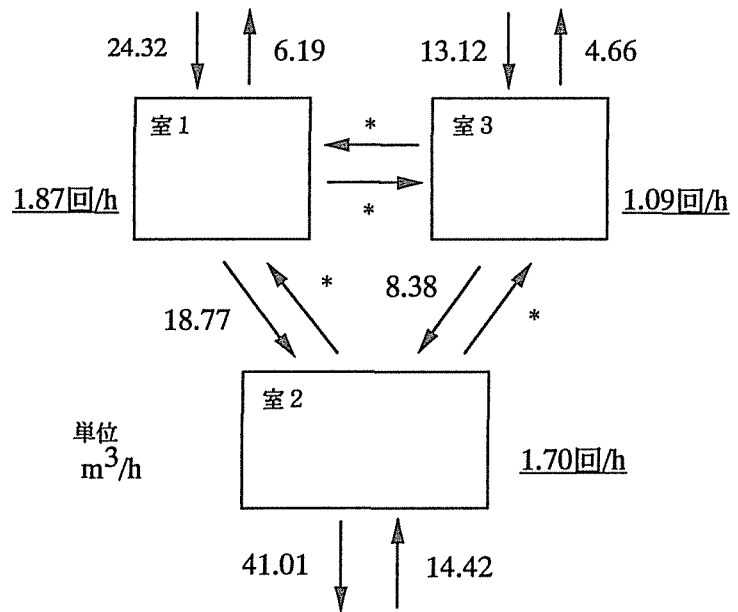


図6 3ゾーン(室)モデルの相互換気量の同定例