

多種 PFT による多数室換気測定 of 統計的データ分析法
Statistical Data Analysis Method for Multizonal Airflow Measurement
Using Multiple Kinds of Perfluorocarbon Tracer Gas

正会員 ○奥山 博康 (清水建設)

正会員 大西 由哲 (清水建設)

正会員 田辺 新一 (早稲田大学)

非会員 柏原 誠一 (旭化成ホームズ)

Hiroyasu OKUYAMA*¹ Yoshinori OHNISHI*¹ Shin-ichi TANABE*² Seiichi KASHIHARA*³

*¹ Shimizu corporation *² Waseda University *³ Asahi Kasei Homes corporation

Synopsis: Conventional multiple types of perfluorocarbon tracers use the number of gases equal to the number of zones (m). The possible m×m+m airflows are solved from the mass balance of the gas and the airflow balance. However, some airflows may not occur because of the actual interzonal geometry, and the introduction of unnecessary, unknown parameters can impair the accuracy of the estimations. Also, various error factors often yield an irrational negative airflow rate. Conventional methods have no procedure for the evaluation of error. This study describes a way to use the least-squares technique to improve the precision of estimates and to evaluate reliability.

1. はじめに

多数室換気測定法には一種類のガスを用いる方法¹⁾²⁾があるが、ガス濃度の時間変化を積極的に生成し測定し記録する現場設置の装置が必要である。一方簡便な器具を用いる PFT (Perfluorocarbon Tracer) と呼ばれる簡易測定法がある。当初³⁾は単室用だったが、近年三種類⁴⁾や四種類⁵⁾の PFT を用いて多数室の換気測定に適用した例が報告されている。一般に n ゾーンの場合には推定すべき風量は最大で n(n+1)個あり得る。各々のゾーンでガス質量の長期間平均の収支式を考える。各々のゾーンで異なった n 種類の PFT を放散すれば n²本の収支式を得る。また風量収支式が n 本成立する。こうして最大未知数に等しい合計 n(n+1)本の方程式が得られて解けるとする従来法の考え方を確定的方法 (deterministic method) と呼ぶことにする。

しかし従来法では測定の前提が成り立つ様に適切に実施されたかの信頼性の評価法が示されていない。前提とは各ゾーンでの濃度が一樣で換気風量も一定なこと等である。また従来の誤差評価は測定誤差だけを考慮したものであり、前提との違いによる誤差が大きいにも関わらず考慮されていない。さらに室間の幾何学的関係から存在しない風量まで未知数として求めなければならない。従って従来の方では不合理な負の風量が求められることも多い。

これらの問題を解決するためには、方程式誤差の存在は認め、この誤差を最小にする風量を正の範囲で求めるという最適化問題として捉え、最小二乗法の様に未知数の個数よりも多くの方程式を測定から得るという統計的方法 (statistical method) により最適解を解く必要がある。本論は既報¹⁾と同様なモデルと解法を展開し、幾つか新たに考案した誤差評価指標を加えたものである。

2. 基本数式モデル

屋内が n ゾーンで、その i 番目のゾーンにおける、ある種のトレーサガスの収支式を次式で記述する。外気も一種のゾーンと見なしゾーン番号は n+1 と定義する。ゾーン j からゾーン i への風量は q_{ji} として記号定義する。ゾーン i

のガス濃度は c_i 、ガス発生流率は g_i 、有効混合容積は v_i と記号定義する。

$$v_i \cdot \dot{c}_i = \sum_{j=1}^{n+1} q_{i,j} \cdot c_j - \sum_{j=1}^{n+1} q_{j,i} \cdot c_i + g_i \quad (1)$$

これを期間 T で積分すれば次式が記述できる。ここに q も v も一定で bar 付きの期間平均値と見なせる程度に一定である前提が必要である。

$$\bar{v}_i \cdot \frac{1}{T} [c_i(T) - c_i(0)] = \sum_{j=1}^{n+1} \bar{q}_{i,j} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T c_j dt - \sum_{j=1}^{n+1} \bar{q}_{j,i} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T c_i dt + \frac{1}{T} \int_0^T g_i dt \quad (2)$$

この左辺は十分な期間 T をとれば 0 に近似できる。右辺の濃度の時間積分を T で除したものは期間平均濃度である。ガス放散量も期間平均放散量となる。これらは同様に bar を付けて表す。すると次の近似式が得られる。

$$\sum_{j=1}^{n+1} \bar{q}_{i,j} \cdot \bar{c}_j - \sum_{j=1}^{n+1} \bar{q}_{j,i} \cdot \bar{c}_i + \bar{g}_i = 0 \quad (3)$$

本理論は統計的方法であるから、なるべく多くの条件の測定値を得る。ガス種 k もゾーン数以上で nk とする。測定期間 p も 1 以上で np とする。ゾーン内濃度測定箇所 l も 1 以上で nl とする。こうして推定精度も向上し誤差評価も適切に行うことができる。これら条件番号 p, k, l で(3)式を次式に書き直す。

$$\sum_{j=1}^{n+1} \bar{q}_{i,j} \cdot \bar{c}_{p,k,l} \bar{c}_j - \sum_{j=1}^{n+1} \bar{q}_{j,i} \cdot \bar{c}_{p,k,l} \bar{c}_i + \bar{g}_{p,k} \bar{g}_i = 0 \quad (4)$$

これは濃度とガス発生量のベクトルを各々次式(5)、(6)の様定義することで(7)式で行列表示ができる。ここに左肩の t は転置を意味する。

$${}_{p,k,l} \mathbf{c} = {}^t ({}_{p,k,l} \bar{c}_1, \dots, {}_{p,k,l} \bar{c}_n, {}_{p,k,l} \bar{c}_{n+1}) \text{ size}(n+1) \quad (5)$$

$${}_{p,k} \mathbf{g} = {}^t ({}_{p,k} \bar{g}_1, \dots, {}_{p,k} \bar{g}_n) \text{ size}(n) \quad (6)$$

$$\mathbf{Q}_{p,k,l} \mathbf{c} + {}_{p,k} \mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (7)$$

外気の濃度も一般に 0 ではないとして記述している。行

列 \mathbf{Q} は風量を含み $n \times (n+1)$ である。右端の列には外気から各ゾーンに入る風量が位置する。

3. 最小二乗法の回帰式と解

複数の風量について求めようとしているので、これを含むベクトル \mathbf{q} を(8)式の様子に定義する。ベクトル内の要素の順番は任意である。(7)式を風量 q に関する式に変形する。サイズが nq のベクトル \mathbf{q} に係る $n \times nq$ の行列 \mathbf{Z} の中身は次の様にして定められる。ここに nq は未知数の風量の個数である。ベクトル \mathbf{q} 内の m 番目の要素が q_{ij} とすれば、この行列内の i 行 m 列めには c_j が来る。また j 行 m 列めには $-c_j$ が来る。ただし i や j が n を超える場合は除外する。

$$\mathbf{q} = (\dots, \bar{q}_{i,j}, \dots) \quad (8) \quad {}_{p,k,l} \mathbf{Z} \cdot \mathbf{q} + {}_{p,k} \mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (9)$$

さらに風量収支の条件式も考慮しなければならない。例えば i 番ゾーンにおける風量収支式は(10)式で表される。全てのゾーンでこれを記述し、この式を風量のベクトル \mathbf{q} によって次式の様子に書き直す。 \mathbf{q} に係る $n \times nq$ の行列 \mathbf{C} の中身は次の様にして定められる。 \mathbf{q} 内の m 番目の要素が q_{ij} とすれば、この行列内の i 行 m 列めには 1 が来る。また j 行 m 列めには -1 が来る。ただし i や j が n を超える場合は除外する。

$$\sum_{j=1}^{n+1} \bar{q}_{i,j} - \sum_{j=1}^{n+1} \bar{q}_{j,i} = 0 \quad (10) \quad \mathbf{C} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{0} \quad (11)$$

最小二乗法の方程式誤差 \mathbf{e} は、以上の \mathbf{Z} , \mathbf{g} , と \mathbf{C} により次式で定義する。ここに記述の簡単化のために行列 \mathbf{F} とベクトル \mathbf{d} を次式の様子に定義する。

$${}_{p,k,l} \mathbf{e} = \begin{bmatrix} {}_{p,k,l} \mathbf{Z} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \cdot \hat{\mathbf{q}} + \begin{bmatrix} {}_{p,k} \mathbf{g} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{q}} + {}_{p,k} \mathbf{d} \quad (12)$$

この誤差 \mathbf{e} の評価関数 J は次式で定義する。

$$J = \sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}^t \mathbf{e} \cdot {}_{p,k,l} \mathbf{e} = \sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} ({}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{q}} + {}_{p,k} \mathbf{d}) \cdot ({}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{q}} + {}_{p,k} \mathbf{d}) \quad (13)$$

最小二乗解は J を $\hat{\mathbf{q}}$ で微分して $\mathbf{0}$ とおいた次式から導かれる。

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\mathbf{q}}} = 2 \sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{q}} + 2 \sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot {}_{p,k} \mathbf{d} = \mathbf{0} \quad (14)$$

この(14)式から最小二乗解は次式で計算される。

$$\hat{\mathbf{q}} = - \left(\sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot {}_{p,k,l} \mathbf{F} \right)^{-1} \cdot \left(\sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot {}_{p,k} \mathbf{d} \right) \quad (15)$$

これは普通の最小二乗法の解である。様々な誤差が起こる実際の状況では、しばしば風量が負として推定される。そこで米国ジェット推進研究所の Charls L. Lawson と Visual Numerics, Inc. の Richard J. Hanson による非負最小二乗法のアルゴリズム (Solving Least Squares Problems, ISBN0- 89871-356-0 (pbk.)) により、非負の範囲で J を最小にする最適の \mathbf{q} を求めることもできる。この場合も基本式は同じである。

4. 方程式の残差分析と推定誤差行列

推定誤差を評価する手がかりの一つが方程式残差である。濃度や放散量の測定誤差だけではなく、方程式モデルと実際の現象の構造的な違いなど様々な誤差原因は、結局は方程式残差に表れる。残差 \mathbf{v} を次式で定義する。

$${}_{p,k,l} \mathbf{v} = {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{q}} + {}_{p,k} \mathbf{d} \quad (16)$$

次に方程式残差の期待値行列を次式で定義する。ここに nt は、 p, k, l による様々な全ての条件総数である。

$$E(\mathbf{e} \cdot {}^t \mathbf{e}) \cong \frac{1}{nt} \sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{v} \cdot {}^t {}_{p,k,l} \mathbf{v} \quad (17)$$

風量の推定誤差分散共分散行列は、この誤差の期待値行列からの誤差伝播として次式で記述できる。

$$\Lambda_{\mathbf{q}} = \left(\sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot {}_{p,k,l} \mathbf{F} \right)^{-1} \cdot \left(\sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot E(\mathbf{e} \cdot {}^t \mathbf{e}) \cdot {}_{p,k,l} \mathbf{F} \right) \cdot \left\{ \left(\sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot {}_{p,k,l} \mathbf{F} \right)^{-1} \right\} \quad (18)$$

この対角要素が風量の誤差分散、非対角要素が共分散である。次に決定係数の計算式を述べる。全ての条件 p, k, l について残差二乗和を $s(\hat{\mathbf{q}})$ とし(19)式で定義する。ガス放散量は期間 p , ガスの種類 k により変化すると見なされるが、ガス吸着位置 l とは無関係と見なされるので(20)式の \mathbf{y} を定義する。

$$s(\hat{\mathbf{q}}) = \sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{v} \cdot {}^t {}_{p,k,l} \mathbf{v} \quad (19), \quad {}_{p,k,l} \mathbf{y} = {}_{p,k} \mathbf{d} \quad (20)$$

ガス放散量ベクトル \mathbf{y} の期間平均との差をとり、様々な条件にわたって二乗和をとった値が総変動 s_y と呼ばれる(21)式となる。決定係数 COD は(22)式で計算される。

$$s_y = \sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} ({}_{p,k,l} \mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}) \cdot ({}_{p,k,l} \mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}) = \sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{y} \cdot {}^t {}_{p,k,l} \mathbf{y} - \frac{1}{nt} \left(\sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{y} \right) \cdot \left(\sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{y} \right) \quad (21)$$

$$COD = 1 - \frac{s(\hat{\mathbf{q}})}{s_y} \quad (22)$$

5. モデル前提の不適合率

ガス放散量とガス濃度の測定誤差だけから推定パラメータへの誤差伝播を記述する。この誤差は実際より過小評価されるが前節の方程式残差からの推定誤差と比較することで様々なモデル前提の適合性が評価できる。方程式残差の(16)式に相当する測定誤差だけによる式を定める。測定値は真値に誤差 \mathbf{s} が加わったものと考え、真値は方程式誤差を 0 にすることを考慮すれば、次式が記述できる。ベクトルの下半分は風量収支の拘束条件を表しているが、下半分は測定誤差には関係ないので 0 と見なすことができる。

$${}_{p,k}\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{p,k} \mathbf{s}_c + {}_{p,k}\mathbf{s}_g \\ \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{p,k} \mathbf{s}_c + {}_{p,k}\mathbf{s}_g \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (23)$$

測定誤差による方程式誤差の期待値行列は、測器の特性としての誤差標準偏差 σ_c と σ_g から(24)式により計算できる。ここに誤差 ${}_{p,k}\mathbf{s}_c$ 、 ${}_{p,k}\mathbf{s}_g$ の間での共分散は0であることと、これら2つのベクトル内の要素間の共分散も0である性質を用いた。また **diag** はこの () の中の行列の対角要素だけによって構成される行列を表す。これにより下半分のベクトルも加わった ${}_{p,k}\boldsymbol{\varepsilon}$ の期待値マトリックスは(25)式で計算される。さらに風量の推定誤差行列は(26)式で計算される。

$${}_{p,k} E({}_{p,k}\boldsymbol{\varepsilon}_u \cdot {}_{p,k}\boldsymbol{\varepsilon}_u) = \mathbf{Q}_{p,k} E({}_{p,k}\mathbf{s}_c \cdot {}_{p,k}\mathbf{s}_c) \cdot \mathbf{Q}_{p,k} + E({}_{p,k}\mathbf{s}_g \cdot {}_{p,k}\mathbf{s}_g) \\ = \mathbf{Q}_{p,k} E(\text{diag}({}_{p,k}\sigma_c \cdot {}_{p,k}\sigma_c)) \cdot \mathbf{Q}_{p,k} + E(\text{diag}({}_{p,k}\sigma_g \cdot {}_{p,k}\sigma_g)) \quad (24)$$

$${}_{p,k} E({}_{p,k}\boldsymbol{\varepsilon} \cdot {}_{p,k}\boldsymbol{\varepsilon}) = \begin{bmatrix} {}_{p,k} E({}_{p,k}\boldsymbol{\varepsilon}_u \cdot {}_{p,k}\boldsymbol{\varepsilon}_u) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$${}^m \Lambda_q = \left(\sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot {}_{p,k,l} \mathbf{F} \right)^{-1} \\ \cdot \left(\sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot {}_{p,k,l} E({}_{p,k}\boldsymbol{\varepsilon} \cdot {}_{p,k}\boldsymbol{\varepsilon}) \cdot {}_{p,k,l} \mathbf{F} \right) \\ \cdot \left\{ \left(\sum_{p=1}^{np} \sum_{k=1}^{nk} \sum_{l=1}^{nl} {}_{p,k,l} \mathbf{F} \cdot {}_{p,k,l} \mathbf{F} \right)^{-1} \right\} \quad (26)$$

数学モデルの前提が、どの程度実現象で成り立っているかの判断を、この ${}^m \Lambda_q$ に対して Λ_q の大きさを比較することによって行うことができる。ここで ${}^m \Lambda_q$ の j 番目の対角要素を $m \sigma_{\lambda_j,j}$ で、 Λ_q の j 番目の対角要素を $\sigma_{\lambda_j,j}$ で表す。これらの対角要素の平方根をとって、次式のモデル前提の不適合率 β およびこの平均値を定義する。

$$\beta_j = \frac{\sigma_{\lambda_j,j}}{m \sigma_{\lambda_j,j}} \quad (27) \quad \bar{\beta} = \frac{1}{nq} \sum_{j=1}^{nq} \beta_j \quad (28)$$

6. 推定風量の符号不合理性の指標

非負最小二乗法も普通の最小二乗法も、実現象とモデル前提の適合性が良く、測定誤差も無ければ結果は一致する。しかし実際には推定結果には違いが生じる。そこでこの違いを利用して測定の妥当性を評価する指標を定める。[i] 普通の最小二乗法の推定風量そのままの結果、[ii] i の結果の中で負のものは逆向きの風量とした結果、[iii] 非負最小二乗法による推定風量の結果において、これら三種の推定方法のうち m 番目の推定結果を ${}_{m,i,j}$ と記述することにし、三種間での平均値を(29)式で定義する。この個々の風量に関する三種推定結果間の平均値に基づいて三種間のばらつきを(30)式の分散 $\sigma_{q_{ij}}^2$ で計算する。

$$\bar{q}_{i,j} = \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 \| {}_{m,i,j} \| \quad (29) \quad \sigma_{q_{ij}}^2 = \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 \left(\| {}_{m,i,j} \| - \bar{q}_{i,j} \right)^2 \quad (30)$$

この風量の分散について、全ての風量にわたる平均値 σ_{q^2} を求める。ここに nq は風量の個数、 n は建物内の総ゾーン

数、 $n+1$ 番は外気のゾーン番号である。また全風量の平均値は非負最小二乗解について次式で計算する。

$$\bar{\sigma}_q^2 = \frac{1}{nq} \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} \sigma_{q_{ij}}^2 \quad (31) \quad \bar{q} = \frac{1}{nq} \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} \| {}_{m,i,j} \| \quad (32)$$

次式の推定パラメータの符号不適合率 R_a が 0.5 以上であれば実験の条件がモデルの仮定と大きく異なるものと考え条件を改善した上で再度測定するものとする。

$$R_a = \frac{\bar{\sigma}_q}{\bar{q}} \quad (33)$$

7. 計算事例

前述の理論の計算プログラム仮称 PFTSID を開発し検算を行うために、多数室モデルにおいて風量を仮定したガス濃度予測計算モデルを作り、ガス濃度を予測計算し、このガス濃度の解と条件のガス発生量に、正規分布の誤差を乱数発生によって加えて、模擬的な測定値を生成した。そしてこの模擬測定値により風量推定と誤差評価を行った。

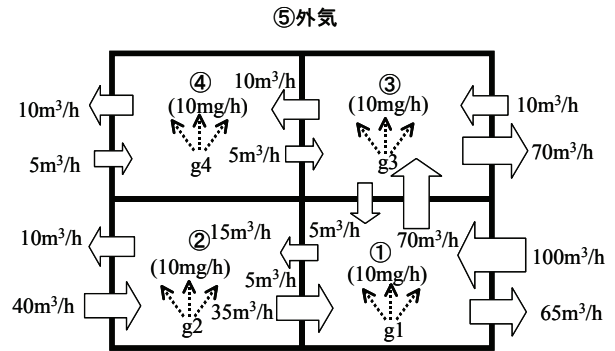


図-1 4ゾーン計算実験モデル

図-1 に示す様に4ゾーンで風量分布を仮定した多数室ガス流動モデルを仮定した。それぞれのゾーンで異なった合計4種類のトレーサーガスを毎時 10mg で放散するものとした。ガス濃度の予測計算はNETSを用い、定常状態を仮定した計算を行ったのでゾーン容積は関係しないが、ゾーン1からゾーン4まで、それぞれ 100m³、25m³、62.5m³、62.5m³ とした。ゾーン2とゾーン4の間は気密性が高く風量が存在しないものとした。

表-1 真値のガス放散率とガス濃度

ガス放散量(mg/h)			
1,1g1	1,2g2	1,3g3	1,4g4
10	10	10	10
ガス濃度(mg/m³)			
1,1,C1	1,2,C1	1,3,C1	1,4,C1
0.07588	0.059051	0.00465	0.00155
1,1,C2	1,2,C2	1,3,C2	1,4,C2
0.008445	0.22915	0.000517	0.000172
1,1,C3	1,2,C3	1,3,C3	1,4,C3
0.06503	0.050608	0.126542	0.042181
1,1,C4	1,2,C4	1,3,C4	1,4,C4
0.043353	0.033739	0.084361	0.694787

ガス発生量はその測定誤差の標準偏差が1を、ガス濃度のそれは0.001として、乱数発生を元にして生成した誤差を表-1に示す真値に加え模擬測定値を作った。ガス濃度は

各ゾーン内で4箇所測定するものとした。各記号はgがガス発生率, cがガス濃度を表し, 左添え字番号と右添え字番号の定義の仕方は, 前述の理論で定義したものと同様である。右添え字番号はゾーン番号を表す。左添え字は, コマを挟んで左から期間番号, ガス種類番号, ゾーン内の位置番号を表す。

従来の確定的方法では, 存在しない風量まで含めた20個を求めることになる。最小二乗法では, ゾーン2とゾーン4の間の風量が存在するかどうかで, 風量の個数が16個のモデルと14個のモデルの二種類について計算した。また風量の推定方法は, 普通の最小二乗法で負の風量はそのままとする方法, 負の風量は逆向きとする方法, そして非負最小二乗法の三種である。これらの結果を真値と比べたのが表-2である。

表-2 各種の推定法の結果

風下側ゾーン	風上側ゾーン	従来法	非負LS q 20個推定	非負LS q 16個推定	非負LS q 14個推定	q真値
5	1	62.50	62.80	63.07	63.01	65
5	2	14.97	14.78	15.03	15.03	10
5	3	64.57	64.89	64.14	64.13	70
5	4	10.56	10.52	10.56	10.63	10
1	5	94.59	94.59	94.58	94.58	100
2	5	42.99	43.10	42.95	42.97	40
3	5	9.70	10.18	10.13	10.13	10
4	5	5.32	5.12	5.14	5.13	5
1	2	33.30	33.28	33.29	33.28	35
2	1	5.36	5.08	5.29	5.35	5
3	4	4.74	4.73	4.72	4.72	5
4	3	10.23	10.02	10.21	10.21	10
1	3	5.06	4.66	5.02	5.03	5
3	1	65.35	64.47	64.53	64.53	70
2	4	0.08	0.07	0.07	-	0
4	2	0.08	0	0	-	0
4	1	-0.29	0.19	-	-	0
1	4	-0.04	0	-	-	0
3	2	-0.04	0.19	-	-	0
2	3	-0.14	0	-	-	0

誤差評価のための各種指標を示す。表-3は風量が14個とした非負最小二乗法の結果のモデル前提の不適合率 β を計算したものである。表-4は推定風量の符号不合理性の指標と β の平均を示したものである。さらに決定係数も算出したが何れのモデルでも殆ど1に近い値となった。

表-3 モデル前提の不適合率

風下側ゾーン	風上側ゾーン	q推定値	q真値	δ 誤差	σ_λ	$m\sigma_\lambda$	β
5	1	63.01	65	-2.00	0.52	12.07	0.04
5	2	15.03	10	5.03	0.21	4.06	0.05
5	3	64.13	70	-5.85	0.29	6.78	0.04
5	4	10.63	10	0.63	0.05	1.11	0.05
1	5	94.58	100	-5.50	0.49	5.43	0.09
2	5	42.97	40	3.01	0.23	5.36	0.04
3	5	10.13	10	0.12	0.36	5.19	0.07
4	5	5.13	5	0.13	0.03	3.25	0.01
1	2	33.28	35	-1.71	0.26	2.88	0.09
2	1	5.35	5	0.34	0.29	6.71	0.04
3	4	4.72	5	-0.29	0.06	0.80	0.07
4	3	10.21	10	0.20	0.04	3.49	0.01
1	3	5.03	5	0.02	0.35	3.93	0.09
3	1	64.53	70	-5.46	0.45	6.40	0.07
平均値		-	-	-	0.26	4.82	0.06

表-4 推定風量の符号不合理性の指標と β の平均

q 推定16個			q 推定14個		
$\bar{\sigma}_a^2$	$\bar{\sigma}_a$	$\bar{\beta}$	$\bar{\sigma}_q^2$	$\bar{\sigma}_q$	$\bar{\beta}$
0.00111	0.0332	0.05	0.0000848	0.00921	0.06
\bar{q}	$R_q = \bar{\sigma}_q / \bar{q}$		\bar{q}	$R_q = \bar{\sigma}_q / \bar{q}$	
26.794	0.00124		30.623	0.000301	

8. 考察と今後の課題

表-2を見ると従来法では負の風量が4個現れており非負最小二乗法との違いが比較的大さい。しかし非負最小二乗法の中で推定風量の個数による推定精度の優劣は, 20個推定の場合がそれ以外と比べて少し劣っているが, 16個と14個の違いは比較的小さい。ただし16個の場合は0であるべき一つの風量が0.07m³/hとなっている。表-3のモデル前提の不適合率を見る。本事例は測定誤差だけに影響され, モデル前提は良好に成立しており, β は平均で0.06と小さい。表-4に示される推定風量の符号不合理性の指標 R_q は, 負の風量を持つ16個推定の場合が, 負の風量を持たない14個の場合に比べて3倍大きい。また決定係数だけでは誤差評価に不十分であることも分かった。これらの誤差評価指標は相対比較に適用可能であるが, 予め判定値を定めるためには今後多くの事例研究が必要である。

本事例では, 本理論の特徴でもあり考慮可能とした, 複数期間, 総ゾーン数より多いガス種, ゾーン内のガス濃度の不均一, そして換気量も時間変化した場合の影響は未だ調べていない。本事例での同一ゾーン内の4カ所の濃度の不均一性は, 測定誤差だけの確率的正規分布のばらつきである。しかし基本数式モデルが時間変化項を省略している以上, 適切な残差分析と誤差評価には限界があると思われる。これが決定係数が殆ど1になった原因でもある。ただし本測定法は, 本来経時変化を追う様な測定法ではなく, 扉や窓の開閉が行われて多少の換気量変化があっても, 長期の平均的な換気量が推定できる利点が期待できる。従ってこの観点からも本論の様な誤差評価理論が重要となる。

9. まとめ

従来の確定的方法に対して, 最小二乗法による統計的風量推定方法と誤差と信頼性の評価方法を考案した。評価指標は統計学におけるものに加え, 新たにモデル前提の不適合率と推定風量の符号不合理性の指標を定義した。さらに本理論の計算プログラム仮称PFTSIDの事例検算をした。また本理論の基本数式モデルから生じる限界を考察し, 長期間の簡易測定法としての意義を述べた。

<謝辞> 日本工業検査株式会社益子智久氏には計算プログラムのコーディングとデバッグ等でお世話になりました。

参考文献

- 1) Hiroyasu Okuyama, "System Identification Theory of the Thermal Network Model and an Application for Multi-chamber Airflow Measurement", Building and Environment, Vol.25, No.4, pp.349-363, 1990
- 2) Hiroyasu Okuyama, "Recent Progress on the Multi-Chamber Airflow Measurement System", 1992 International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness ISRACVE, 22-24 July 1992, Tokyo, pp351-356
- 3) Stymme, H. and Boman, C.A., Measurement of Ventilation and air distribution using the homogeneous emission technique a validation, Healthy Buildings, '94, Proceedings of the 3rd International Conference (1994)
- 4) 東田浩毅, 田辺新一等, "パッシブ測定法を用いた室内空気質評価 その10 換気量簡易測定法を用いた集合住宅実測", 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.991-992, 2004年8月
- 5) 三原邦彰, 吉野 博, 熊谷一清, 野口美由貴, 柳沢幸雄, 4種類のパッシブトレーサーガスを用いた換気性能評価 - 実験及び数値計算による測定精度検証 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 講演番号41336, 頁689-690, 2006年9月