

正会員 ○奥山博康(清水建設)

大西由哲(清水建設)

正会員 竹林芳久(清水建設)

正会員 鈴木道哉(清水建設)

長島由明(ナショナル住宅産業)

辻 賢二(ナショナル住宅産業)

### はじめに

多数室換気測定法は、従来の単室扱いの測定法が持つ誤差の欠点と機能的な不十分さを解消するものとして、国内外で研究されている。一方この問題は多変数入出力システムの同定という観点から興味深く、著者は熱回路網のシステムパラメータの同定理論[1]を考案し、一つの応用として多数室換気測定システムを開発した。さらに検証実験[2]を行い、理論とハードの改良[3]も行ってきた。本論は、さらなる理論的な改良、二室モデルでの検証実験と現場測定データを利用した誤差の検討等を述べたものである。

### 理論的な改良

風量の非負性の拘束条件を考慮する理論的改良を行い、適用した結果については既に報じている[3]。本論ではその数式的表示の概要を付録に追補する。また本システムパラメータ同定理論では、必ず全ての風量を未知として求めるのではなく、幾つかは既知として与えることも可能としていた。しかし'95年の秋に、こうした使い方での理論の間違いが発見されたので修正を行った。そこでこの概要も付録に示す。

### 実験室実験と検証結果

二室モデルは3.6mの正方形の建物を間仕切り壁で二つに分けたものであり、ナショナル住宅産業の技術研究所の人工気象室内に存在した。室間と室と外気との相互換気は、入口

に小型ファンを付けた長さ600mm内径106mmの円筒のダクトを通して行い、その中の風速を熱線風速計によって予め測定して風量を求めた。トレーサーガスとして炭酸ガスを用いた図1のような検証のための装置を作成した。この装置は炭酸ガスを断続的に放出してガス濃度変化を作り、これらのガス濃度変化とガス放出の流量変化を測定する。ガス濃度変化は各ポイント20秒間隔で測定した。外気濃度は300ppmで一定と見なした。こうして得られた測定データを熱回路網のシステムパラメータ同定計算プログラムSPIDで処理すれば、多数室における室間の風量等の複数の風量が推定される。これらの推定された風量と風速測定からの風量を比較した。測定されたガス濃度変化とガス放出量変化のグラフを図3に示す。この場合は一周期30分で各室に5分ずつガスを放出した。システム同定には30分間の測定値を用いた。推定された風量と測定された風量を比較して表1に示す。測定風量に対して最大で約20%の違いが見られる。この結果に至るまで試行錯誤しながら次の幾つかの誤差の原因を小さくする必要があった。①室内のガス濃度の不均一性、②巾木や廻り縁等の目に見えない隙間からの空気の出入り、③小型ファンの風量が過大、④室内気流のショートカット、⑤ガス分析計と流量計の誤差、⑥データ処理系の間違いや誤差、等である。最低限の室数の単純なモデルにも係わらず誤差が大きと思われる。今後測定装置や建物の改良を行いたい。

---

Theoretical improvement and error investigation on multi-chamber airflow measurement

OKUYAMA hiroyasu et al.

## 多数室換気測定システムの概要

アパートの現場測定に用いたのは、ハード的には市販のガスモニターと多点ガス注入・多点空気サンプリング装置を利用して開発したシステムであり図2に示す。これらの装置を制御するのは自作のプログラムである。測定システムは、各室に六フッカ硫黄ガスを断続的に放出し、十分なガス濃度変化を作り出し、この時のガス注入流量変化と各室のガス濃度変化を測定する。得られた測定データを前述のSPIDで処理するが、SPIDは風量だけではなく、室の有効混合容積等も推定することができる。

## 現場測定

東京近郊の某マンションで測定を行った。当建物は11階建てで測定したのは5階の一戸であり、専有面積73.4m<sup>2</sup>の3LDKである。この居間のベランダは南東向きである。比較的に細かいゾーン割りと粗いものの二種類の同定モデルを想定した。各々のゾーン番号は細かいモデルで①北東洋室、②北西洋室、③居間・食堂、④洗面室、⑤玄関ホール、⑥台所、⑦和室、⑧浴室、⑨トイレと⑩外気であり、粗いモデルで①北東洋室、②北西洋室、③居間・食堂・台所・和室、④洗面室・浴室、⑤玄関ホール・トイレと⑥外気である。ガスの放出チューブと空気の吸入チューブの本数は細かいモデルに合わせて各々10本設置した。細かいモデルに合わせて間仕切り襖やドアやカーテンを閉めた状態を小区画状態と呼び、粗いモデルに合わせて間仕切りを開けた状態を大区画状態と呼ぶことにする。従って大区画状態でありながら、細かいモデルでシステム同定することも可能である。なお各ゾーンでは直径10cm程度の冷却ファンを1、2個設置してガスを混合した。ガス放出のスケジュールは一周期100分とし、この中で各ゾーン一回づつ、室の容積に応じて6分から9分間の放出を行った。間仕切りや機械換気を変更しな

い限り、数時間から24時間にわたり、このガス放出スケジュールを繰り返した。換気測定システムを動かしたのは、'95年9月4日の夕方から9月8日の朝までである。小区画にしたのは5日の16:38から6日の9:40までと、7日の13:10から15:10までであり、これ以外は大区画状態である。機械換気したのは、5日の13:05から14:58までが浴室・トイレONで台所OFF、同日14:58から16:38までが浴室・トイレOFFで台所ON(中)、9月7日の10:20から浴室・トイレONで台所もON(中)を最後まで続けた。これらの他は隙間風だけの状態である。なお5日を除く毎朝9時ぐらいから1時間程度窓を開放して換気した。

## 誤差の分析方法

本システム同定理論は誤差の分析理論[1]も伴っている。それは方程式の残差から同定パラメータまでの誤差伝播則を記述したものである。しかし今回は、より簡便で直感的な方法によった。すなわちシステム同定された風量により、ガス流動の計算機シミュレーションモデルを構成し、このモデルに対して、測定されたガス放出量変化と外気濃度を与えて計算された各室のガス濃度変化と、測定された各室のガス濃度変化の誤差の二乗平均平方根RMS(Root Mean Square)を判断基準とした。

## 誤差の検討

誤差の大きさを検討したのは、風量に関する非負の拘束の有無(ULS:Usual Least Squares, NLS:Nonnegative Least Squares)、同定期間の長短やシステム同定モデルの細かさによる違いである。まず誤差原因が多い実際の状態では、非負の拘束無しよりも有りの方が表2に示すように誤差が小さくなるのが分かった。図4には各々の同定法によるガス流動の計算モデルで計算したガス濃度を測定濃度と比較して示す。非負の拘束無しで得られた風量によるガス流動のモデルでガス濃度変化を計算すると、測定値から大きく外れていくのが分か

る。同定期間の長短に関しては、もし換気駆動力の変化が無く、風量が一定で変化しない限り、最小二乗法の特性として同定期間が長い方が誤差が小さくなるはずである。しかし実現象は変化するから最適期間が存在することになる。表2から分かるように2時間程度が最小の誤差となる。この最適期間は同定すべき風量の個数が増えれば大きくなるであろうし、問題により同じではない。次に同定モデルが比較的細かい9室モデルについて隙間風の状態を図5に示す。一戸全体での外気との換気風量については細粗の両者のモデルに大きな違いは無かった。実際に空間の仕切が無ければ、同定モデルも仕切を設けない方が精度的には有利である。参考に機械換気状態の結果を図6に示す。

## まとめ

特殊な使い方と判明した本システム同定理論の間違いを修正した。検証実験は測定装置や建物の改良を行いたい。精度検討のために、同定された風量でガス濃度流動の予測計算モデルを作り、予測値と測定値の誤差の二乗平均平方根RMSに着目する方法も有用である。実際の様々な誤差の多い状況では、非負拘束条件を持つ最小二乗法が比較的良い精度を示す様である。

## 【謝辞】

北海道電力(株)総合研究所の土井聰様には、本理論を修正すべきご指摘を頂いたおかげで改良することができました。ここに厚く御礼申し上げます。

## 【参考文献】

- [1]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, 第344号, 昭和59年10月, pp103-115
- [2]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
- [3]Hiroyasu Okuyama, Recent Progress on the Multi-chamber Airflow Measurement System, 1992 International symposium on Room Air convection and Ventilation effectiveness ISRACVE July 1992 Tokyo, pp.351-356, 1992

## 【付録】理論の改良

改良・修正した内容については紙幅の関係上、既出の論文[2]を加筆・修正する形で述べる。さて風量収支の式は、風量が未知(nc個)や既知(nc個)を問わず全ての風量 $c_j$ を含んだベクトルを $\mathbf{c}$ とすれば、全ゾーンからn本の式が成立して、 $\mathbf{F}_0 \cdot \mathbf{c} = \mathbf{0}$ と表せる。次に既知として与える風量は右辺に移項し定数ベクトル $\mathbf{b}$ を構成する。同定すべき風量だけで構成されるベクトルを $\hat{\mathbf{c}}$ とすれば、前出の風量収支の式は $\mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{c}} = \mathbf{b}$ と表示できる。風量のベクトル $\hat{\mathbf{c}}$ の中の要素を並べ替え、およそn個の風量 $\hat{c}_{rs}$ (従パラメータ)を他の風量 $\hat{c}_{m}$ (主パラメータ)によって計算できるように変形を施して $\mathbf{F}_r \cdot \hat{\mathbf{c}}_r = \mathbf{b}_r$ と表示する。従ってこの式の中身は次のように記述できる。

$$[\mathbf{E}, -\mathbf{S}] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{c}}_{rs} \\ \hat{\mathbf{c}}_m \end{bmatrix} = \mathbf{b}_r \quad (62)$$

ここに $\mathbf{E}$ はサイズnの単位マトリックスである。さてこの風量の拘束条件の取り込み方は論文[2]の方法の中と、論文[3]の非負最小二乗法の中では異なってくる。

まず風量に非負の拘束条件を付ける場合には、論文[3]等に述べているが、Lawson, C.L. と R.J.Hanson(1974)による非負最小二乗法のアルゴリズムを利用した。これは行のサイズが列のそれと等しいか大きい、観測値から構成される長方マトリックスを $\mathbf{A}$ とし、この行のサイズに等しいベクトルを $\mathbf{d}$ とし、推定すべきパラメータのベクトルを $\mathbf{a}$ とした場合に、 $\mathbf{A} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{d}$ を満たす非負の $\mathbf{a}$ を求める問題の解法である。一方論文[2]に述べている観測マトリックス $\mathbf{Z}_k$ は行がnで列は推定するパラメータの個数に等しい。正規マトリックスを構成するのは毎タイムステップの $\mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{W}_k \cdot \mathbf{Z}_k$ を全タイムステップで総和したものである。また対応する観測値から構成されるベクトルは $\mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{W}_k \cdot \mathbf{y}_k$ を全タイムステップで総和したものである。ここで(62)で表される拘束条件は、 $\mathbf{A} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{d}$ の行方向に追加する形で考慮することにした。従ってこの場合は風量収支が最小二乗の意味で考慮され、ある程度の誤差を持つことになる。各々 $\mathbf{A}$ と $\mathbf{d}$ は次式で表される。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^p \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{W}_k \cdot \mathbf{Z}_k \\ \mathbf{0}, \quad [\mathbf{E}, -\mathbf{S}], \quad \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^p \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{W}_k \cdot \mathbf{y}_k \\ \mathbf{b}_r \end{bmatrix} \quad (64)$$

ここに $\mathbf{A}$ の(2,1)のブロックは被同定 $m_{ij}$ に対応し(2,3)は被同定 $r_{ij}$ に対応する。

次に論文[2]においては(62)の風量収支の条件は構造的に組み込まれる。さて既報[2]で抜けていたのは、次のように観測ベクトル $\mathbf{y}$ に加えるべき、既知風量とガス濃度変化から作られるベクトルであった。

$$\mathbf{y} = -\mathbf{X}(x_i) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{b}_r \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (65)$$

ここに $\Leftarrow$ はアルゴリズム的な加算を表す。以上が理論的な改良・修正の凡その内容である。

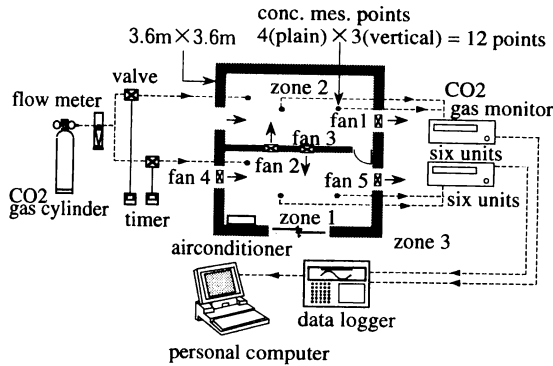


Figure 1 Laboratory verification experiment

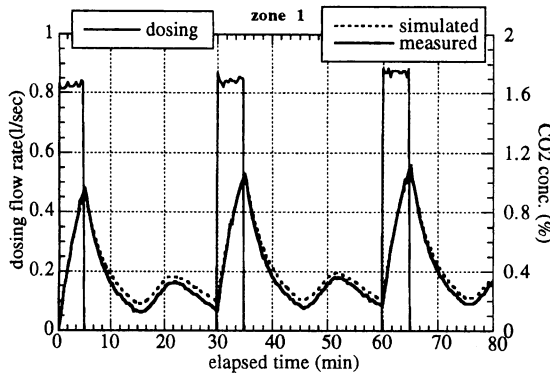


Figure 3 CO2 concentration and dosing flow rate in zone 1

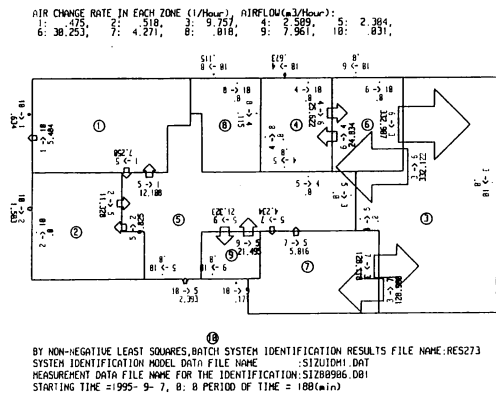


Figure 5 Airflow rates in fine model ( fans off )

Table 1 Verification results

| Airflow (m <sup>3</sup> /hour) | measured | estimated | estimated measured (%) |
|--------------------------------|----------|-----------|------------------------|
| 1 → 2                          | 111      | 90        | 81                     |
| 2 → 1                          | 117      | 114       | 97                     |
| 1 → 3                          | 115      | 136       | 118                    |
| 3 → 1                          | 131      | 112       | 85                     |
| 3 → 2                          | 130      | 157       | 120                    |
| 2 → 3                          | 113      | 133       | 118                    |

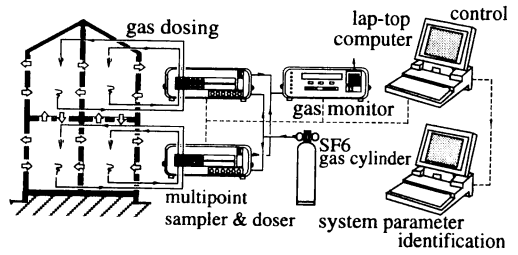


Figure 2 Multi-chamber airflow field measurement system

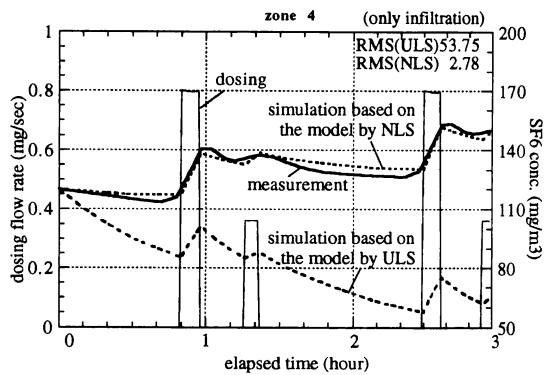


Figure 4 Measured and simulated SF6 gas concentration in zone 4

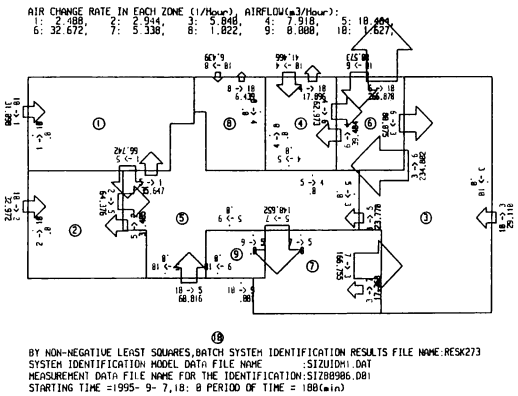


Figure 6 Airflow rates in fine model ( fans on )

Table 2 RMS Error Analysis

| method                     | period(min) |       |       |       |
|----------------------------|-------------|-------|-------|-------|
|                            | 240         | 180   | 120   | 100   |
| Usual Least Squares        | 43.01       | 38.95 | 29.98 | 21.70 |
| Non-negative Least Squares | 1.86        | 1.33  | 1.11  | 1.14  |