

# 換気を含めた熱性能指標の推定

## Estimation of Building Thermal Performance Parameters Including Ventilation

奥山 博康 Hiroyasu Okuyama

清水建設(株)技術研究所 主席研究員 工学博士

〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17

Institute of Technology, Shimizu corporation, Chief Researcher, Dr.Eng.

4-17, Etchujima 3-chome, Koto-ku, Tokyo 135-8530, e-mail:okuyama@sit.shimz.co.jp

### 要約

本熱回路網の数学モデルは、建物における温度だけでなくガス濃度の拡散系も一般的に表現している。建物の熱性能は、この数学モデルでの熱コンダクタンス、熱容量や熱流の吸収率の三種のパラメータで評価される。また換気性能を評価する風量や有効混合容積はこれらの前二者に相当する。この熱回路網の三種のパラメータを現場測定から推定するシステム同定理論を最小二乗法によって導いた。さらに換気測定に関しては、従来法の問題点と本理論による解決策を述べ、適用例も紹介する。

### Summary

The presented thermal network mathematical model expresses not only temperature, but also some types of gas dispersion systems in buildings. Buildings' thermal performances are evaluated by three types of parameters, thermal conductance, capacity or absorptivity of heat flux, whereas the airflow rate and the effective mixing volume correspond to the former two parameters. A system identification theory has been deduced from the least square method for these three parameters based on the field measurement. Regarding ventilation measurement, the problems of the conventional methods and the solution by this theory are described and an application example is introduced.

**Keywords:** 熱回路網, システム同定, 建物性能, 現場測定, 多数室換気測定 /  
thermal network model, system identification, building performance, field measurement, multi-zonal airflow measurement

### 1 はじめに

本論の熱回路網モデルは一般的な拡散系の数学モデルであるが、このモデルに基づいて、予測計算とは逆のシステム同定理論[1]を展開した。この理論を二次元有限要素法伝熱モデルに適用して熱コンダクタンスや日射吸収率のシステム同定[7]で試し、さらに集合住宅でこれらのパラメータの現場測定[9]を実施したりしている。また本理論を多数室でのトレーサーガスの流動系に応用し、多数室換気測定システム[8]を開発した。第一世代の測定システムは炭酸ガスを用いたものであったが、スウェーデンでの検証実験[2][16]の後にSF6を用いた第二世代のシステムに改良し、さらに多くの実適用[3][5][11][12][13]だけでなく、建築研究所での検証実験[10][14][15]も行っている。本論では、まずシステム同定理論の概要を述べる。次に従来の換気測定法ではシステム同定という考え方が無いために多くの問題が残されていたが、本システム同定理論によってこれらの問題点の多くは解決することができるので、本測定法の適用事例とともに紹介する。

### 2 熱回路網のシステム同定理論

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  $c_{i,j}$  と呼ぶ一種類の係数

で表現している。また節点に関する熱収支式は、次式(1)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  $n_0$  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。式(1)は計算対象物の空間次元や形に依存しないで一般的に成り立つ。熱容量節点系の全体では(5)式のベクトル・マトリックスの常微分方程式が構成される。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、規定状態入力ベクトルを(3)式で、自由入力ベクトルを(4)式で定義している。

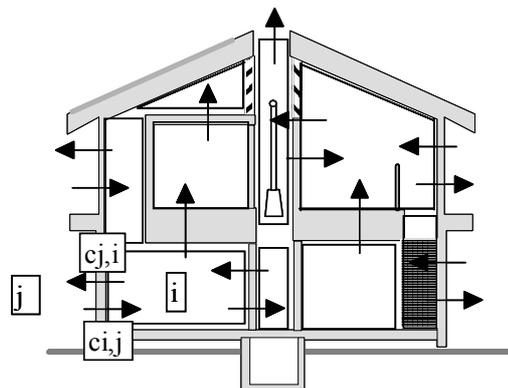


図1 一般化コンダクタンス  $c_{i,j}$  の方向性

一方,拡散量が温度ではなく,換気測定におけるトレーサーガス濃度である場合には,(1)式はトレーサーガスの質量収支式を表す.ここに $x_j$ はjゾーンのトレーサーガス濃度, $c_{ij}$ はjゾーンからiゾーンへの風量, $m_{ij}$ はiゾーンに関わる有効混合容積, $g_j$ はトレーサーガス発生量で, $r_{ij}$ はガス発生器jからiゾーンへの入力率となる.

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

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

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

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

$$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{C}_0 \cdot \mathbf{x}_0 + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g} \quad (5)$$

一般には $m_{ij}$ , $c_{ij}$ あるいは $r_{ij}$ のうち少なくとも1つは与条件として与え,この既知パラメータから構成される項は左辺の $y$ にまとめ,右辺では推定すべきパラメータのベクトル $\mathbf{a}$ を括り出し次式を構成する.この方程式を観測方程式あるいは測定方程式と呼ぶ.具体的にこの観測方程式を構成するアルゴリズムは既報[1][2]に述べている.

$$\mathbf{y} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{a} \quad (6)$$

方程式誤差 $\mathbf{e}$ を次式で定義する.

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{a} \quad (7)$$

方程式誤差の二次形式を測定期間で積分した量 $J$ を, $\mathbf{a}$ の推定のための評価関数とする.

$$J(\mathbf{a}) = \int_0^T {}^t \mathbf{e} \cdot \mathbf{e} dt = \int_0^T {}^t (\mathbf{y} - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{a}) \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{a}) dt \quad (8)$$

評価関数 $J$ をパラメータ $\mathbf{a}$ にて微分することで, $\mathbf{a}$ を推定する式が得られる.

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{a}} = 0 \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{a}} = \left[ \int {}^t \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Z} dt \right]^{-1} \cdot \left[ \int {}^t \mathbf{Z} \cdot \mathbf{y} dt \right] \quad (10)$$

推定したパラメータ $\mathbf{a}$ が持つ誤差の分散共分散マトリックスは次式で表される.

$$\Lambda_a = E \left[ (\hat{\mathbf{a}} - E(\hat{\mathbf{a}})) \cdot (\hat{\mathbf{a}} - E(\hat{\mathbf{a}}))^t \right] = \left[ \int {}^t \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Z} dt \right]^{-1} \cdot \left[ \int {}^t \mathbf{Z} \cdot E(\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}^t) \cdot \mathbf{Z} dt \right] \cdot \left[ \int {}^t \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Z} dt \right]^{-1} \quad (11)$$

方程式誤差の二次形式の期待値として,一旦推定されたパラメータによる観測方程式の残差の時間的な平均値を次式で計算して用いる.

$$E(\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}^t) = \frac{1}{T} \int_0^T \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^t dt \quad (12)$$

なお以上の計算は観測値が連続的に得られている場合であるが,実際には数分間隔の離散時間で観測値が得られるのが普通である.従って以下に離散時間観測値でシステム同定を行う計算式を記述する.まず(6)式の内容を表す(1)式での諸変数を $t$ の時間間隔で次のように積分する.

$${}_b x_k = \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} \dot{x} dt \cong x(k\Delta t) - x((k-1)\Delta t) \quad (13)$$

$${}_s x_k = \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} x dt \cong \frac{\Delta t}{2} \cdot (x(k\Delta t) + x((k-1)\Delta t)) \quad (14)$$

$${}_s g_k = \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} g dt \cong \frac{\Delta t}{2} \cdot (g(k\Delta t) + g((k-1)\Delta t)) \quad (15)$$

これらの積分された変数で(6)式を再構成し,方程式誤差(7)も次式で表示する.ここに $k$ は時刻添え字である.

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{y}_k - \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{a} \quad (16)$$

時間積分の区間は  $t$  で  $p$  区間に分割して考えれば, (10) 式は次式の様に総和による式で近似される.

$$\mathbf{a} = \left( \sum_{k=1}^p {}^t \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{Z}_k \right)^{-1} \cdot \left( \sum_{k=1}^p {}^t \mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{y}_k \right) \quad (17)$$

この式で有効混合容積と換気風量は推定される. また同定誤差に関する分散共分散マトリックスの (11) 式も離散時間の式にする.

そのためにもまず, (12) 式に対応する離散時間での方程式誤差の期待値は, 次式のように残差  $v$  として次式で計算し, これを (19) 式に代入する.

ここにシステム同定の誤差の原因は, 測定機器の誤差よりも, ガス濃度変化の数学モデルと実現象の差異や, 時間的不変性等の仮定や有効混合容積の仮定によるものが大きいと考えられる. しかしこれらの諸々の原因は結局方程式残差になって現れると考えられるので, 方程式誤差分散から同定パラメータの誤差分散への誤差伝播により評価するのが妥当である. つまり測定機器の誤差分散からの伝播を記述するよりも誤差評価には妥当である.

$$E(\mathbf{e}_j \cdot {}^t \mathbf{e}_j) = \frac{1}{p - na} \sum_{j=1}^p \mathbf{v}_j \cdot {}^t \mathbf{v}_j \quad (18)$$

ここに  $na$  は推定すべきパラメータの総数であり, 多数室換気測定の場合は, 有効混合容積と換気風量の 2 種類を推定する場合が多い.

$$\Lambda_a = E[(\hat{\mathbf{a}} - E(\hat{\mathbf{a}})) \cdot {}^t (\hat{\mathbf{a}} - E(\hat{\mathbf{a}}))] \\ = \left( \sum_{j=1}^p {}^t \mathbf{Z}_j \cdot \mathbf{Z}_j \right)^{-1} \\ \cdot \left( \sum_{j=1}^p {}^t \mathbf{Z}_j \cdot E(\mathbf{e}_j \cdot {}^t \mathbf{e}_j) \cdot \mathbf{Z}_j \right) \cdot \left( \sum_{j=1}^p {}^t \mathbf{Z}_j \cdot \mathbf{Z}_j \right)^{-1}$$

この分散共分散マトリックスの対角要素には, 推定した有効混合容積や換気風量の推定誤差分散がくる. 既報の [1][2] では以上の一括同定の他に, 逐次同定も演繹したが, 多くの数値実験 [7] により精度が良くないことが分かっているので, 以来もっぱら一括同定を用いている. また同定パラメータの非負拘束条件を考慮するために, 非負最小二乗法 [18] を導入し改良した. なお本システム同定計算プログラムは SPID(System Parameter Identification) と呼んでいる.

### 3 多数室換気測定システム

建築換気は, 機械換気だけでなく, 内外温度差や外部風が要因となる隙間風や自然換気による分も大きい. 従って空気流動の所在や分布の直接的測定は難しく, トレーサーガスをを用いた換気測定が有用である. 以降ではシステム同定法 (ガス断続発生法) と呼ぶ多数室換気測定法と他の測定法を比較しながら, 各測定法の問題点を考察する. またシステム同定法による実建物での測定実施例も紹介する. 測定システムを図 2 に示す. また図 3 には測定装置系の制御プログラム MAMS や模擬測定データを作成する NETSPID の構成を示す.

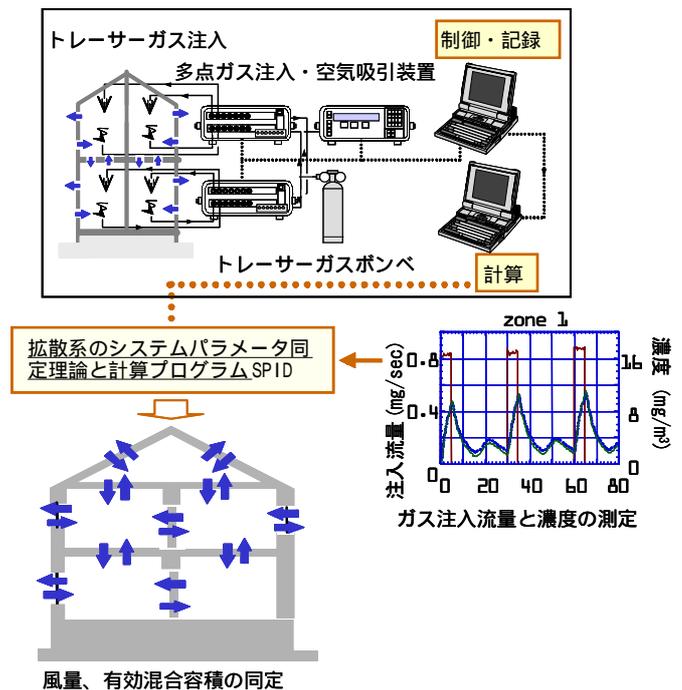


図 2 多数室換気測定システム

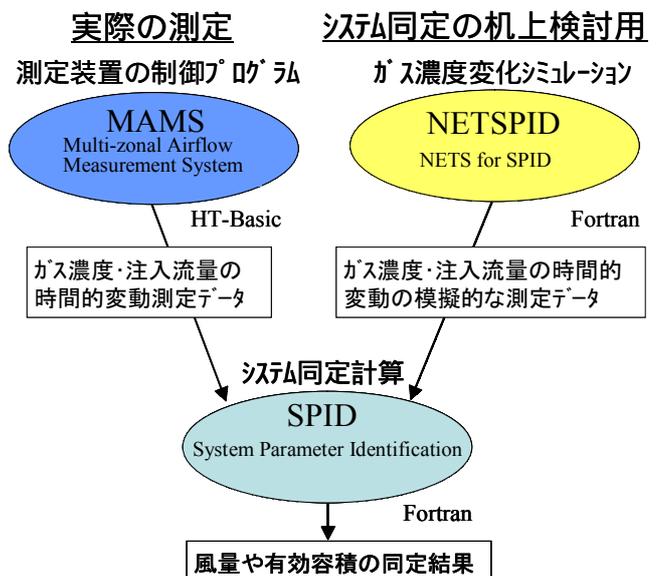


図 3 多数室換気測定の三種のプログラム

ガスの注入も空気の吸引もコンピュータ制御する。多点ガス注入装置を経由して各ゾーンに断続的にガスを注入し、各ゾーンで時間的にも室間的にも変化する濃度を作り出す。これらの変動するガス注入流量とガス濃度の測定データに基づいてシステム同定計算プログラムSPIDにより、外気も含むゾーン間の風量、有効混合容積、ガス注入比率等の三種の拡散系のパラメータを推定する。現測定システムでは、ガス濃度測定に1分かかるので、評価関数の時間積分も1分間隔の台形近似積分であり、さらに空気吸引切り替え装置により1台のガス分析器で多数ゾーンを1分毎に切り替えて濃度測定するので、時間的線形補間近似を行っている。こうしたハードウェアの制約による誤差や、チューブ配管の手間による実用性に関する今後の研究開発課題等が残っている。

#### 4 各種の換気測定法の分類

現状の単室扱いの換気測定法に関して問題点を検討し、表1のようにまとめた。本システム同定法は単室の場合にも適用可能なので表1に含めた。ガス濃度変化の微分項 $dc/dt$ の性状によって、測定法を静的測定法と動的測定法に大別することができる。一定濃度法は、ガス濃度変化が無い様に能動的に制御を試み、一定供給法は、受動的にガス濃度変化が無いことを期待する方法と見なせるから、ともに静的測定法と呼ぶことができる。なお実現象において厳密な

表1 各種の換気測定法の問題点

静的測定法	一定濃度法	$dc/dt=0$ に制御する方法 ..... 多数ゾーンに適用された場合、一様濃度となるために、隣接ゾーン経由の外気が全く換気量として評価されない。
	一定供給法	$dc/dt=0$ と強いて見なす方法 ..... 自然換気駆動力の変動により正確には $dc/dt=0$ とはならないので、誤差になるか、有効混合容積 $V$ を仮定しなければならなくなる。
動的測定法	減衰・増加法	消極的に $dc/dt < > 0$ の過渡状態を利用する方法 ..... $dc/dt < > 0$ といっても変化に乏しく、従って有効混合容積 $V$ の仮定が必要となる。
	システム同定法	積極的に $dc/dt$ の変動状態を継続的に作り出す方法 ..... 測定データ自体の陽的な解釈が難しく、計算プロセスも分かり難い

定常状態は無いことにより静的測定法は誤差の問題がある。一方、減衰法も増加法も消極的ながらもガス濃度変化の過渡状態を利用し、さらに本システム同定法は積極的かつ継続的に濃度変化を生ぜしめた状況を利用するので、何れも動的測定法に分類できる。

#### 5 多数室換気測定の必要性

例えば一定濃度法は、多数ゾーンに適用した場合に図4に示すような吹き抜け空間を経由してくる外気は全く評価されないので、本質的には建物全体を単室扱いとした測定法と考えるべきであろう。言い換えればこうした意味で、室間の風量も測定できる多数室換気測定法が必要である。

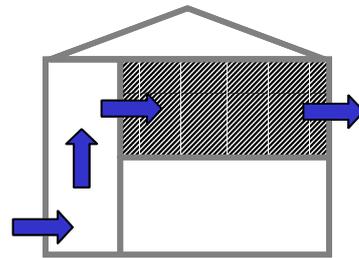


図4 一定濃度法は隣室経由の換気が測定不能

#### 6 有効混合容積

有効混合容積と呼ぶものについて考えてみる。これはガス濃度変化の常微分方程式に縛られたパラメータと見なさなければならないが、室の幾何的容積あるいはこれ以下の一定の容積とは異なり、本来は変化するものと考えべきである。従来法は幾何的容積を有効混合容積と仮定する 경우가多いが、システム同定法では換気風量と共に推定することが可能である。仮にガスの混合状況を支配する気流分布は変化しないとしても、ガス供給の停止や開始の変動があつてから、この影響が及ぶ容積は、その変動からの経過時間に依存すると考えられる。従つてもし減衰法や増加法において、有効混合容積を一定と仮定する限り、ガス供給の変動からの経過時間によって、推定される換気風量も少し異なった値になると考えられる。言い換えれば、換気量の推定に室の幾何的容積を用いる限り、適切な経過時間はどれぐらいかという問題がある。これは $dc/dt$ をゼロと見なさない、あるいは見なせない全ての測定法に関して言えることであり、断続的なガス供給を行うシステム同定法においても適切な断続周期があると考えなければならない。例えば極端な場合であれば、秒単位の短い周期でガス発生が断続しても、適切な濃度変化応答は得られないであろう。そこで断続発生

法では、適切なシステム同定を行うための系への最適励振は、どのような周期と振幅かという問題がある。しかし有効混合容積も換気風量と同時に推定できる方法では、前述の問題はある程度回避することができる。もし短絡の流れや成層の流れが無視できず存在する場合はむしろ積極的に有効混合容積も推定する必要があるだろう。

## 7 換気量の時間変化

一般に外風の風向風速の変化があり、また外気温の変動による内外温度差の変化があるので、多少なりとも換気量も変動するものと考えるのが一般的問題設定である。従ってこの場合にはガス濃度変化の微分方程式において微分項は無視できず、何らかの動的測定法を適用しなければならない。ガス濃度の微分項には有効混合容積が乗じられている形で扱うならば、有効混合容積も推定できなければならない。もし方程式の両辺を有効混合容積で除した形で扱うならば、換気量ではなく換気回数しか求められず、実用上不十分である。

## 8 統計的方法と決定論的方法

従来の測定法は基本的にガス濃度変化過程の1, 2時点の測定値があれば換気量を決定できる決定論的方法である。これに対して断続注入によるシステム同定法は、時系列的に変化に富んだ多くの測定値を必要とする統計的方法である。一般に測定においては様々な雑音や原因により測定値自体が誤差を持つことを認識すれば、決定論的な方法ではなく統計的な方法をとるべきであろう。

## 9 誤差の評価方法

誤差の評価は、統計的方法において初めて適切に行えることであり、決定論的な方法では適切に行えないであろう。ましてや換気風量等の推定誤差は、測定機器自体の誤差よりは、幾何的室容積と有効混合容積の食い違いや、換気風量の変動などの数学モデルと実現象の差異が、より大きな要因と考えられるから、方程式残差からの伝播則として誤差評価を行える統計的方法をとるのが適切であろう。

## 10 望ましい換気測定法

近年のコンピュータの発達により現状の測定・制御機器が、多点の連続的測定と同時的な数値処理や制御が可能となり、機能的にも性能的にも向上したことを活用すべきである。また前述の3.2から3.7までの考察も含めて総合的に考えると、動的測定法に属するシ

ステム同定法が有利ではないかと考える。ただしシステム同定法にも幾つかの種類がある。換気量等の時間変化の問題に関しては、幾つかの計算機実験から、カルマンフィルタや筆者の逐次同定法よりも、本論の一括同定法を行う期間を少しずつ移動していく方法が、誤差と安定性の観点から優れていると考える。

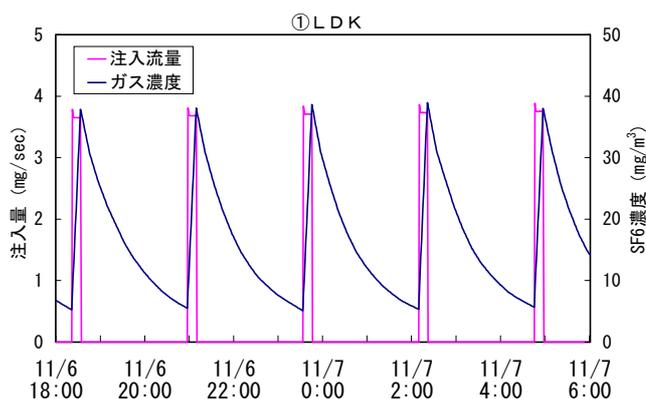


図5 LDKでのガス濃度と注入流量の変化

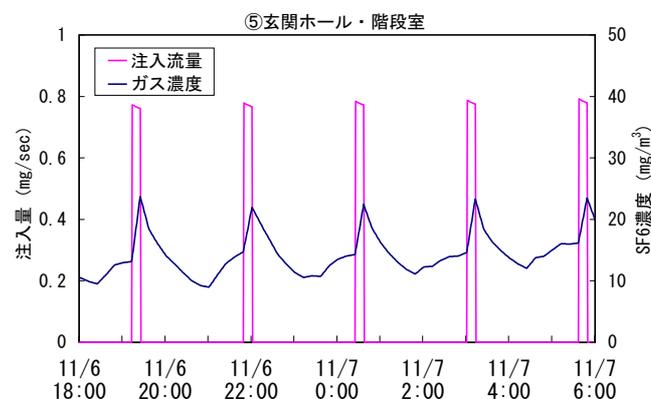


図6 玄関ホール・階段室でのガス濃度と注入流量の変化

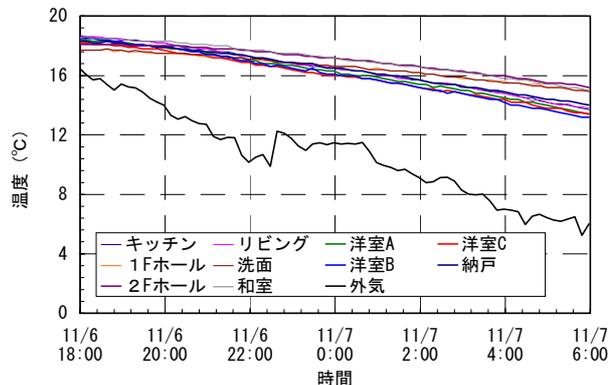


図7 各室の中心温度と外気温度の変化

### 1.1 断続注入法による測定実施例

本多数室換気測定を、つくば市の(財)ベターリビング筑波試験センター内に建てられた在来軸組構法の二階建木造住宅で、平成13年11月6日朝から11月12日朝まで実施した。これ以外の期間は一定濃度法等の測定法を実施している。建物と換気システムや他の測定方法について詳しくは既報[17]に譲るが、本測定時には第三種ダクト式(ダクト式排気セントラル)が稼動していた。連続的に測定されたガス濃度変化のデータから図5や6に示すような11月6日18時~7日の6時までの12時間分の測定データについてシステム同定した結果を図9に示す。この期間では機械換気風量が強い状態であり、図7に示すように平均的外気温度は約10℃、建物内は約17℃、外気風速は2m/s前後であった。建物全体での換気回数は、本測定法では約0.6回/時となったが、一方同様な条件で熱線式風量計による排気風量からは0.5回/時、一定濃度法では約0.64回/時となった。全般的風量分布に一定濃度法と顕著な違いは見られなかったが、幾つかの室においては隣室からの風量と直接侵入外気量を合計した風量が、一定濃度法での直接侵入外気量に近くなっている状況が認められた。

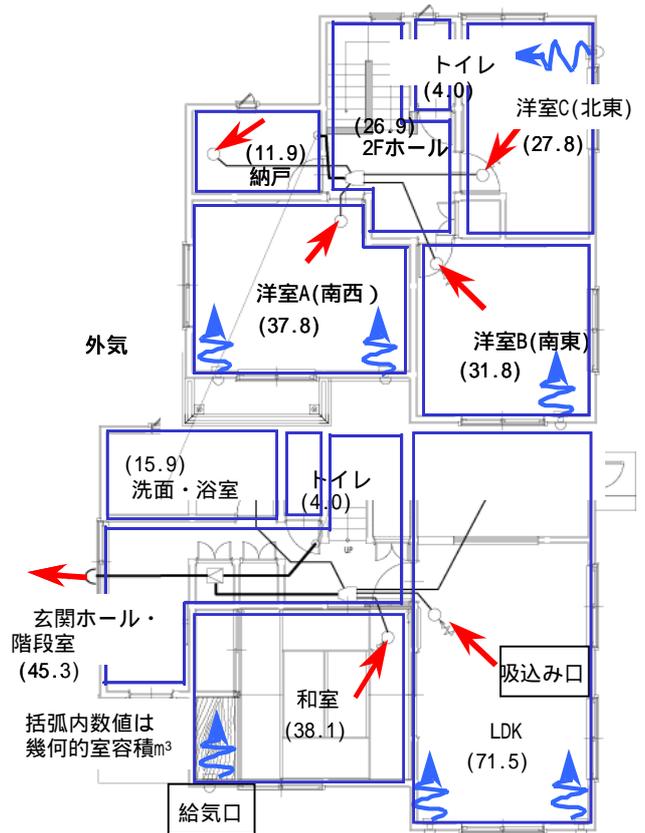


図8 第三種ダクト式稼動時の設計上流れと幾何的室容積

### 1.2 まとめ

本論では、熱回路網モデルによるシステム同定モデルと最小二乗法に基づいて演繹したシステム同定理論の概要を述べ、これに基づく計算プログラムSPIDとその機能の概要についても述べた。熱回路網モデルの汎用性は、様々な伝熱・拡散形態を一種類の一般化熱コンダクタンスの定義で表現していることや、完全連結システムの節点方程式が対象物の空間次元や形状によらず成立すること等により実現される。建物熱性能の現場評価方法については既報の研究を紹介した。さらにこのシステム同定理論による多数室換気測定法を適用事例とともに紹介した。また従来の各種換気測定法の分類を行い、これらの問題は統計的なシステム同定という観点に達していないことから派生していることを指摘した。総合的観点から、断続的ガス注入による一括同定と呼ぶシステム同定法が優れていることも述べた。

### 【謝辞】

本論で述べたSPIDのユーザーインターフェイスの開発は建築研究所の澤地先生のご指導により、国交省・シックハウスプロジェクトで行うことができました。また本事例の測定だけでなく、参考文献に上げ

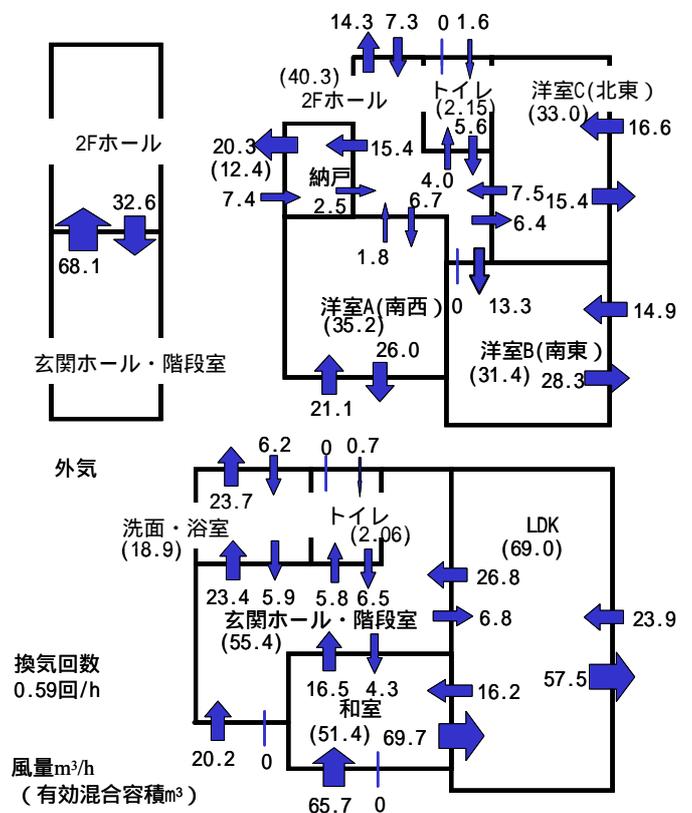


図9 システム同定結果の風量分布と有効混合容積

た様々な測定におきましても、多くの方々の理解と協力で実施できました。また本論をまとめる際にも、同僚の大西由哲氏の協力を得ました。

#### 【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ーの同定理論」, 日本建築学会論文報告集, Vol. 344, 1984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, 22-24 July 1992, Tokyo, pp351-356
- [4] Hiroyasu Okuyama, "Thermal and Airflow Network Models for Computer Simulation and Measurement in Building Multi-zone Systems", Proceedings of the 4th international symposium on Ventilation for Contaminant Control, held in Stockholm, September 5-9, 1994, pp121-126
- [5] Hiroyasu Okuyama, Yoshiaki Nagashima, Kenji Tsuji, Akira Hatanaka, "Error Analysis and verification of Multi-chamber Airflow Measurement", Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Air Distribution in Rooms, ROOMVENT'96, July 17-19, 1996, pp39-46
- [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ーの同定理論」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1983年9月, pp511-512
- [7] 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ーの同定理論(その2:有限要素法によるシステムパラメーターの逆探問題への適用)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1984年10月, p. 657
- [8] 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ーの同定理論(その3:多数室換気測定システムの適用)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1985年10月, pp409-410
- [9] 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ーの同定理論(その4:建物の熱的性能の現場測定法への適用)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986年8月, pp723-724
- [10] 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(その5:多数室換気測定システムの検証実験)」, 建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, 1988年10月, pp827-828

- [11] 奥山博康, 「多数室換気測定システムの新たな進展」, 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集, 1991年, pp1089-1092
- [12] 奥山博康, 大西由哲, 竹林芳久, 鈴木道哉, 長島由明, 辻賢二, 「多数室換気測定法の理論的改良と誤差検討」, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, A-21, 1996年9月, pp525-528
- [13] 奥山博康, 梶間智明, 鈴木道哉, 竹林芳久, 「多数室換気測定法の現場測定における誤差検討」, 建築学会大会学術講演梗概集(環境工学2), 1996年9月, pp613-614
- [14] 奥山博康, 澤地孝男, 瀬戸裕直, 大西由哲, 「トレーサーガスを用いた換気性状把握手法の検証と改良(その2)検証実験の結果」, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, A-27, 1997年8月, pp437-440
- [15] 奥山博康, 澤地孝男, 瀬戸裕直, 大西由哲, 「トレーサーガスを用いた換気性状把握手法の検証と改良(その1)予備実験の結果」, 建築学会大会学術講演梗概集(環境工学2), 1997年9月, pp641-642
- [16] David Etheridge, Mats Sandberg, "BUILDING VENTILATION Theory and Measurement", JOHN WILEY & SONS, ISBN 0 471 96087 X, 1996  
本書には著者の多数室換気測定システムに関するスウェーデンでの検証実験が p. 607-p. 626 の中に紹介されている。
- [17] 根本, 澤地, 瀬戸, 高橋, 成田, 渡部, 岡部, 尾本, 奥山, 坂本, 田島, "室内空気質改善を目的とした複数の換気システムを有する実験住宅における換気・温熱環境に関する研究その1全体概要", "同主題その2換気測定概要", "同主題その3外部風が換気量に与える影響", "同主題その4換気量と温熱環境", 建築学会2002年度大会(金沢)・学術講演梗概集・環境工学
- [18] Lawson, C.L., and R.J. Hanson. 1974. Solving least squares problems. Prentice-Hall, Inc.
- [19] (特許) 名称: 多数室間拡散系の測定解析システム(多数室換気測定システム)  
出願: 昭和60年4月22日, 公開: 昭和61年10月31日,  
公告: 平成5年1月11日, 登録: 平成5年10月22日(登録番号1792616)  
出願番号: H5-221662(平成5年9月7日)  
なお本特許はトレーサーガスの拡散系だけでなく, 温度の拡散系(伝熱系)など一般に適用できるものとして拡張してある。

付録：建物の熱・換気性能の現場測定システム改良案

