

多数室建物の伝熱・換気のシステム同定理論と不確かさ分析法及び事例検討 System Parameter Identification Theory and Uncertainty Analysis Methods for Multi-zone Building Heat Transfer and Infiltration and Case Study

正会員 奥山 博康 (神奈川大学)

Hiroyasu OKUYAMA

Kanagawa University

Synopsis: Methods for on-site measurement of building thermal performance system parameters such as coefficient of heat loss, solar heat gain, effective thermal capacity, infiltration rate, and effective mixing volume are very important, yet a nontrivial task. In this regard, a state space equation model, referred to as a “thermal network model,” has been devised to generalize such multi-zone heat transfer system and tracer gas diffusion system measurements. This model is composed of three parameter types, and we have developed a system parameter identification theory and uncertainty analysis method using least squares, as well as actual measurement systems. In the present paper, we improve the least-squares regression equation, the uncertainty analysis method, and the reliability evaluation method. We investigate appropriate excitation waveforms and frequencies for heating and tracer gas release, as well as a low-pass filter for preprocessing measurement data. We verify these theories and methods using computer-simulated measurement.

1. はじめに

多数室建物での熱損失係数、日射取得係数と有効熱容量の現場測定法は重要である。また正しい評価のためには同時に多数室換気測定を行うことが望ましい。1980年代初期の奥山の理論1)に関し、ここ数年は風量収支等の拘束条件の組み込み定式化法、不確かさ分析法、信頼性評価指標、さらに最適励振と測定値の濾波法等の再考と改良を行っている2)。さらにこれらの改良の効果を、建物の熱損失係数と隙間風性能に関する模擬測定の実例で検証した。

2. パラメタの観測方程式

拡散系の空間的離散化モデルの骨組みは一般に(1)式の完全連結システムの節点方程式で記述できる。これにより状態空間方程式とも呼ぶ連立常微分方程式(2)が構成される。ここに x_j , m_{ij} , c_{ij} , r_{ij} は各々、節点 j の温度等の拡散ポテンシャル、節点 i に関する一般化容量、節点 j から節点 i への一般化コンダクタンス、熱流等の発生源 j から節点 i への自由入力係数である。また n は未知数扱いの、 no は既知数扱いの節点数、 ng は発生源の総数である。

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

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{C}_0\mathbf{x}_0 + \mathbf{R}\mathbf{g} \quad (2)$$

この(2)式を次のパラメタの観測方程式(3)に変形する。一つの節点まわりには既知パラメタが少なくとも一個あるとし、変数 x_j か g_j との積によって作られる項は左辺の \mathbf{y} の中に移項する。また被同定パラメタ m_{ij} , c_{ij} , r_{ij} によるベクトルを \mathbf{m} , \mathbf{c} , \mathbf{r} として、これに係るマトリックスは \mathbf{D} , \mathbf{X} , \mathbf{G} と定める。これらをまとめて次数 na の \mathbf{a} と $n \times na$ の \mathbf{Z} を定める。

$$\mathbf{y} = \mathbf{D}(\dot{\mathbf{x}}_i)\mathbf{m} + \mathbf{X}(x_i)\mathbf{c} + \mathbf{G}(g_i)\mathbf{r} = [\mathbf{D}, \mathbf{X}, \mathbf{G}] \begin{bmatrix} \mathbf{m} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} = \mathbf{Z}\mathbf{a} \quad (3)$$

測定時間間隔 Δt 、総測定時点数は nt で測定期間は T とする。 $(k-1)\Delta t$ から $k\Delta t$ までの線形補間積分により次式の \mathbf{y}_k , \mathbf{Z}_k を定義し(6)をパラメタの観測方程式とする。

$$\mathbf{y}_k = \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} \mathbf{y} dt \quad (4) \quad \mathbf{Z}_k = \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} \mathbf{Z} dt \quad (5) \quad \mathbf{y}_k = \mathbf{Z}_k \mathbf{a} \quad (6)$$

3. 最小二乗法の二重適用による解法

(6)式の左辺から右辺を引いた方程式誤差を ${}^t_n\mathbf{e}_k$ とし ${}^t_n\mathbf{e}_k \cdot {}^t_n\mathbf{e}_k$ の時間総和を \mathbf{a} により微分し最小化条件を記述する。これが拘束条件と複合して持つ誤差を \mathbf{e}_a とし(7)式を記述する。またパラメタ間には、流量収支、伝導の対称性、伝導率等の上位のパラメタへ回帰する n_s 本の拘束条件式が存在するので $\Delta t \mathbf{S}\mathbf{a} = \Delta t \mathbf{d}$ なる拘束条件式が記述できる。これも最小二乗条件式を取り複合条件式で持つ誤差を \mathbf{e}_s とすれば(8)式となる。

$$\mathbf{e}_a = \sum_{k=1}^{nt} {}^t\mathbf{Z}_k \mathbf{y}_k - \sum_{k=1}^{nt} {}^t\mathbf{Z}_k \mathbf{Z}_k \mathbf{a} \quad (7) \quad \mathbf{e}_s = \Delta t^2 \cdot {}^t\mathbf{S}\mathbf{d} - \Delta t^2 \cdot {}^t\mathbf{S}\mathbf{S}\mathbf{a} \quad (8)$$

(7)式と(8)式を束ねて次式の複合回帰方程式誤差 \mathbf{e} を定義する。次式で簡単化のためにベクトル \mathbf{b} とマトリックス \mathbf{F} を定める。

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_a \\ \mathbf{e}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{nt} {}^t\mathbf{Z}_k \mathbf{y}_k \\ \Delta t^2 \cdot {}^t\mathbf{S}\mathbf{d} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{nt} {}^t\mathbf{Z}_k \mathbf{Z}_k \\ \Delta t^2 \cdot {}^t\mathbf{S}\mathbf{S} \end{bmatrix} \mathbf{a} = \mathbf{b} - \mathbf{F}\mathbf{a} \quad (9)$$

不偏推定をするための重みマトリックス \mathbf{W}_a と \mathbf{W}_s を導入する。 \mathbf{W}_a は $\sum {}^t\mathbf{Z}_k \cdot \mathbf{Z}_k (na \times na)$ の各行の最大絶対値を探して二乗の逆数を \mathbf{W}_a の i 列に代入するが、ある行が全て0の場合は1を代入する。故に \mathbf{W}_a の次数は $(na \times na)$ となる。同様に $\Delta t^2 \cdot {}^t\mathbf{S}\mathbf{S}$ について $\mathbf{W}_s (na \times na)$ を作る。これらの \mathbf{W}_a と \mathbf{W}_s を対角に持つ重みマトリックス \mathbf{W} により ${}^t\mathbf{e}\mathbf{W}\mathbf{e}$ の評価関数を作る。二重の最小二乗による \mathbf{a} の推定値が(10)式となる。また推定パラメタの不確かさ分散共分散マトリックス Λ_a は、方程式誤差の期待値マトリックスからの伝搬として計算すれば(11)式が得られる。

$$\hat{\mathbf{a}} = ({}^t\mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{F})^{-1} \cdot ({}^t\mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{b}) \quad (10)$$

$$\Lambda_a = ({}^t\mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{F})^{-1} ({}^t\mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{E}(\mathbf{e} \cdot {}^t\mathbf{e})\mathbf{W}\mathbf{F}) \left\{ ({}^t\mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{F})^{-1} \right\} \quad (11)$$

右辺の中にある $\mathbf{E}(\mathbf{e} \cdot {}^t\mathbf{e})$ の方程式誤差期待値マトリックスは、共分散を0とみなせば次式となる。

$$\mathbf{E}(\mathbf{e} \cdot {}^t\mathbf{e}) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}(\mathbf{e}_a \cdot {}^t\mathbf{e}_a) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E}(\mathbf{e}_s \cdot {}^t\mathbf{e}_s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

右辺の誤差の期待値 $E(\cdot)$ は二通り定義でき、以降で方程式残差からのものには添え字 r (residue) を、測定不確かさからのものには m (measurement) を付けて表わすことにする。

4. 方程式残差からの不確かさ伝播と決定係数

(6)式の残差は次の(13)式で計算され、その期待値マトリックスは(14)式で計算される。

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{y}_k - \mathbf{Z}_k \cdot \hat{\mathbf{a}} \quad (13)$$

$$E(\mathbf{v}_k \cdot {}^t \mathbf{v}_k) = (1 / (nt - na)) \text{diag} \sum_{k=1}^{nt} \mathbf{v}_k \cdot {}^t \mathbf{v}_k \quad (14)$$

これにより $\mathbf{e}_a \cdot {}^t \mathbf{e}_a$ の期待値マトリックスは(15)式で計算され、これを適用した場合の Λ_a を ${}_m \Lambda_a$ とする。次に決定係数の算出に必要な残差二乗和は(16)式で計算される。

$$E_r(\mathbf{e}_a \cdot {}^t \mathbf{e}_a) = \sum_{k=1}^{nt} {}^t \mathbf{Z}_k \cdot E(\mathbf{v}_k \cdot {}^t \mathbf{v}_k) \cdot \mathbf{Z}_k \quad (15)$$

$$s(\hat{\mathbf{a}}) = \sum_{k=1}^{nt} {}^t \mathbf{v}_k \cdot \mathbf{v}_k = \sum_{k=1}^{nt} {}^t (\mathbf{y}_k - \mathbf{Z}_k \cdot \hat{\mathbf{a}}) \cdot (\mathbf{y}_k - \mathbf{Z}_k \cdot \hat{\mathbf{a}}) \quad (16)$$

総変動 s_y は次の(17)式で計算される。さらにこれらの残差二乗和と総変動から決定係数は次の(18)式で計算される。

$$s_y = \sum_{k=1}^{nt} {}^t (\mathbf{y}_k - \bar{\mathbf{y}}_k) \cdot (\mathbf{y}_k - \bar{\mathbf{y}}_k) = \sum_{k=1}^{nt} {}^t \mathbf{y}_k \cdot \mathbf{y}_k - \frac{1}{nt} \left(\sum_{k=1}^{nt} {}^t \mathbf{y}_k \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^{nt} \mathbf{y}_k \right) \quad (17)$$

$$COD = 1 - \frac{s(\hat{\mathbf{a}})}{s_y} \quad (18)$$

拘束条件式の $E_r(\mathbf{e}_s \cdot {}^t \mathbf{e}_s)$ ($na \times na$) は次式で計算する。

$$E_r(\mathbf{e}_s \cdot {}^t \mathbf{e}_s) = \Delta t^4 \left({}^t \mathbf{S} \mathbf{d} - {}^t \mathbf{S} \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{a}} \right) \cdot \left({}^t \mathbf{S} \mathbf{d} - {}^t \mathbf{S} \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{a}} \right) \quad (19)$$

以上の $E_r(\mathbf{e}_a \cdot {}^t \mathbf{e}_a)$ と $E_r(\mathbf{e}_s \cdot {}^t \mathbf{e}_s)$ を(12)式に代入して(11)式により ${}_m \Lambda_a$ を計算する。この対角要素から方程式残差起源の同定パラメータ不確かさ分散が得られる。

5. 測定不確かさからの伝播

ガス濃度やガス発生量の測定不確かさ分散から推定パラメータへの不確かさ伝播を記述する。いま x_i と g_i の測定値が瞬時的な測定不確かさ分散 σ_x^2 と σ_g^2 を持つとする。これらの x_i と g_i を Δt の区間で積分した値と増分を時系列方向に総和して用いるが x_i と g_i に関する Δt 積分の不確かさ分散 ${}_s \sigma_x^2$ 、 ${}_s \sigma_g^2$ や、増分計算結果の不確かさ分散 ${}_m \sigma_x^2$ は、不確かさ伝播則により次の様に計算される。

$${}_b \sigma_{x_i}^2 = 2 \cdot \sigma_{x_i}^2 \quad (20)$$

$${}_s \sigma_{x_i}^2 = (1/2) \cdot \Delta t^2 \cdot \sigma_{x_i}^2 \quad (21) \quad {}_s \sigma_{g_i}^2 = (1/2) \cdot \Delta t^2 \cdot \sigma_{g_i}^2 \quad (22)$$

ここで測定データのベクトルと、これらが持つ不確かさ分散ベクトルを次のように定義する。

$${}_b \mathbf{x}_k = {}^t ({}_b x_{1k}, \dots, {}_b x_{nk}) \quad (23) \quad {}_b \boldsymbol{\sigma}_k = {}^t ({}_b \sigma_{x1}, \dots, {}_b \sigma_{xm}) \quad (24)$$

$${}_s \mathbf{x}_k = {}^t ({}_s x_{1k}, \dots, {}_s x_{nk}, \dots, {}_s x_{n+no,k}) \quad (25)$$

$${}_s \boldsymbol{\sigma}_x = {}^t ({}_s \sigma_{x1}, \dots, {}_s \sigma_{xm}, \dots, {}_s \sigma_{x_{n+no}}) \quad (26)$$

$${}_s \mathbf{g}_k = {}^t ({}_s g_{1k}, \dots, {}_s g_{ngk}) \quad (27) \quad {}_s \boldsymbol{\sigma}_g = {}^t ({}_s \sigma_{g1}, \dots, {}_s \sigma_{gng}) \quad (28)$$

${}_b \mathbf{x}_k$ 、 ${}_s \mathbf{x}_k$ 、 ${}_s \mathbf{g}_k$ は各々真値に不確かさ ${}_b \mathbf{s}_{xk}$ 、 ${}_s \mathbf{s}_{xk}$ 、 ${}_s \mathbf{s}_{gk}$ が加わったものと見なす。パラメータの推定不確かさ原因は x_j と g_j の測定不確かさだけとすれば、真値の x_j と g_j は状態方程式誤差を 0 にする。従って(2)式等から次式が記述できる。

$${}_n \mathbf{e}_k = -\mathbf{M} \cdot {}_b \mathbf{x}_k + [\mathbf{C} \quad \mathbf{C}_0] \cdot {}_s \mathbf{x}_k + \mathbf{R} \cdot {}_s \mathbf{g}_k$$

$$= -\mathbf{M} \cdot {}_b \mathbf{s}_{xk} + [\mathbf{C} \quad \mathbf{C}_0] \cdot {}_s \mathbf{s}_{xk} + \mathbf{R} \cdot {}_s \mathbf{s}_{gk} \quad (29)$$

状態方程式誤差が x_j と g_j の測定不確かさだけに起因するとすれば、方程式誤差 ${}_n \mathbf{e}_k$ の期待値マトリックスは次式で計算される。ここに不確かさ ${}_b \mathbf{s}_{xk}$ 、 ${}_s \mathbf{s}_{xk}$ 、 ${}_s \mathbf{s}_{gk}$ の間での共分散は 0 であることと、これら 3 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。

$$E({}_n \mathbf{e}_k \cdot {}^t \mathbf{e}_k) = \text{diag}(\mathbf{M} \cdot E({}_b \mathbf{s}_{xk} \cdot {}^t \mathbf{s}_{xk}) \cdot {}^t \mathbf{M}$$

$$+ [\mathbf{C}, \mathbf{C}_0] \cdot E({}_s \mathbf{s}_{xk} \cdot {}^t \mathbf{s}_{xk}) \cdot [\mathbf{C}, \mathbf{C}_0] + \mathbf{R} \cdot E({}_s \mathbf{s}_{gk} \cdot {}^t \mathbf{s}_{gk}) \cdot {}^t \mathbf{R})$$

$$= \text{diag}(\mathbf{M} \cdot \text{diag}({}_b \sigma_x \cdot {}^t \sigma_x) \cdot {}^t \mathbf{M}$$

$$+ [\mathbf{C}, \mathbf{C}_0] \cdot \text{diag}({}_s \sigma_x \cdot {}^t \sigma_x) \cdot [\mathbf{C}, \mathbf{C}_0] + \mathbf{R} \cdot \text{diag}({}_s \sigma_g \cdot {}^t \sigma_g) \cdot {}^t \mathbf{R}) \quad (30)$$

これにより次式が計算される。

$$E_m(\mathbf{e}_a \cdot {}^t \mathbf{e}_a) = \sum_{k=1}^{nt} {}^t \mathbf{Z}_k \cdot E({}_n \mathbf{e}_k \cdot {}^t \mathbf{e}_k) \cdot \mathbf{Z}_k \quad (31)$$

また拘束条件式誤差の期待値マトリックスは方程式誤差の原因が測定不確かさだけならば 0 であるので次式が記述できる。

$$E_m(\mathbf{e}_s \cdot {}^t \mathbf{e}_s) = E\left\{(\mathbf{d} - \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{a}}) \cdot {}^t (\mathbf{d} - \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{a}})\right\} = 0 \quad (32)$$

これらの $E_m(\mathbf{e}_a \cdot {}^t \mathbf{e}_a)$ と $E_m(\mathbf{e}_s \cdot {}^t \mathbf{e}_s)$ を(12)式に代入し(11)式により ${}_m \Lambda_a$ を計算する。この対角要素から測定不確かさ起源の同定パラメータ不確かさ分散が得られる。

6. システム同定モデル前提の不適合率

線形性、時不変性、空間離散化近似等の同定モデルの前提が、どの程度実現で食い違っているかの判断を、この ${}_m \Lambda_a$ に対して ${}_r \Lambda_a$ 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 ${}_m \Lambda_a$ の j 番目の対角要素を ${}_m \sigma_{\lambda, jj}^2$ で、 ${}_r \Lambda_a$ の j 番目の対角要素を ${}_r \sigma_{\lambda, jj}^2$ で表す。これらの対角要素の平方根をとって次式のシステム同定モデル前提の不適合率 β を定義する。

$$\beta_j = \frac{{}_r \sigma_{\lambda, jj}}{{}_m \sigma_{\lambda, jj}} \quad (33)$$

この β が 1 よりもかなり大きい場合には測定の条件やモデルに不適切さがあると考えられるので修正する必要がある。

7. システム同定の最適励振と測定データの最適前処理

多数室換気測定の場合と異なり伝熱系では室温の節点のみで躯体の節点は省かざるを得ず粗いモデルとなり構造的な差異が大きい。この粗いモデルでも電熱ヒータ加熱を矩形波ではなく 72 時間等の低周波数の正弦波で行えば比較的良好な同定結果が得られる。この時に室温の節点の有効熱容量には室空気だけでなく周囲壁体等のものが含まれる。矩形波はフーリエ級数展開した際に高周波成分を持ちこれがシステム同定に悪影響を及ぼすと考えられる。

一方、測定不確かさはギザギザの様相を示し、やはり高周波成分であるが、移動平均のスムージングを施せば改善され、もし 1 分間隔の測定値であれば、10 から 60 分の期間で効果がある。

この移動平均はローパスフィルタの効果も持つ。全ての測定値をこのフィルタにかけることで粗いモデルでも良い結果が得られる様である。ただしローパスフィルタ機能としての移動平均期間は 8 時間等の長いものとなる。最適の期間は有効熱容量と決定係数が比較的に大きくなることで

探索できる。ただしシステムパラメータを求めるために移動平均をかけた測定値を用いても、不確かさと信頼性の評価のためには元の測定値を用いなければならない。

8. 模擬測定値生成モデルとシステム同定モデル

断面図南北幅 10m, 図の奥行き東西幅 10m の総床面積 $100\text{m}^2 \times 2 = 200\text{m}^2$ で高さ 6m の 2階建て 2室のモデルで多数室換気と熱性能の模擬測定値を生成した。熱的仕様は Table1 に示す。隙間風は相当隙間面積 400cm^2 , 指数 1.5 でモデル化した。Fig.1 に示す様な構造の熱・換気回路網モデルを作り、様々な正弦波励振周期について、シミュレーションプログラム NETS を用いて冬季 3 日間の助走期間の後の 6 日間の模擬測定値を得た。また熱コンダクタンスは同じで壁体節点の熱容量を木造系の 2.5 倍とした重い建物モデルも作り模擬測定値を生成した。測定誤差が無い模擬測定値の他に、測定不確かさを標準偏差を仮定し、乱数発生による誤差を加えた模擬測定値も用意した。

Table 1 Thermal properties of building materials

Walls	Plywood	15 mm	Roof	Plywood	15 mm
Out In	Air layer	20 mm	Out In	Air layer	50 mm
	Thermal insulation (glass wool)	100 mm		Thermal insulation (glass wool)	100 mm
	Plywood	15 mm		Plywood	15 mm
1 st floor	Plywood	15 mm	Glass and air layer	Glass	3 mm
	Thermal insulation (glass wool)	100 mm	Out In	Air layer	12 mm
				Glass	3 mm
				Window area of each floor	10 m ²
2 nd floor	Plywood	15 mm	Air layer of 2 nd floor	11.11	W/m ² K
	Air layer	500 mm	Air layer of walls and roof	11.11	W/m ² K
	Plywood	15 mm	Air layer of windows	14.49	W/m ² K
			equivalent conductance		
	Density	550 kg/m ³	Glass wool	10 kg/m ³	2500 kg/m ³
	Specific heat	1.30 kJ/kgK	Glass	0.75 kJ/kgK	1.3 kJ/kgK
	Thermal conductivity	0.186 W/mK	Air	0.78 W/mK	1.0 kJ/kgK

Solar thermal property: Building outer surface absorptance is 0.80, each glass transmittance is 0.87 and reflectance is 0.08 at normal incidence angle, and for Shoji screen 0.25 and 0.60 respectively.

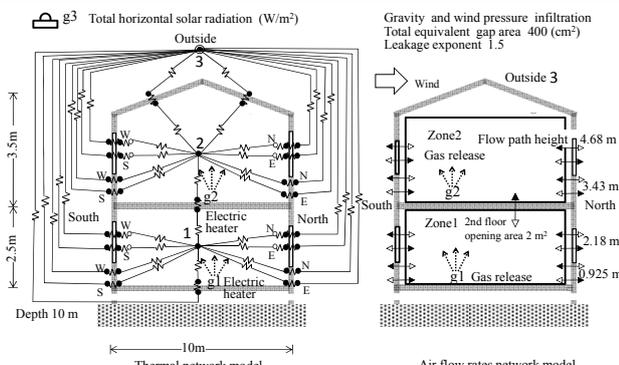


Fig. 1. Measurement simulation models

電熱ヒータの容量は過熱を避け周期に応じ 8kw と 4kw に変えたが 72 時間周期の場合は各室 4kw とした。トレーサガス SF₆ の放出容量は 1mg/s とし放出周期は 1.5 時間で停止期間は 6 時間を繰り返した。これらの最適条件は COD が比較的大きくなる様に探索法で求めた。

2 種のシステム同定モデルは Fig.2 に示す。トレーサガス拡散系では 2 節点モデルとする。一方実際の建物温度測定では壁体内部と表面の理想的測定は難しいこと等から室温測定値だけになるのでシステム同定モデルは 2 節点モデルとした。また換気の一般化熱コンダクタンス c_{ij} の非対称性を考慮し伝熱系でも非対称の c_{ij} として同定するのが理想的であるが、実際試みたところ様々な誤差原因により不合理な結果になるので対称性の拘束を c_{ij} に与えた。

換気系のシステム同定結果は期間平均風量だから真値も期間平均風量をとった。一方、伝熱の c_{ij} の真値は、その期間平均換気量の真値を移流分とし、次に換気モデルを除き定常熱負荷計算から貫流分を求め、両者を加えて真値とした。日射熱取得係数の r_{ij} は、Table3 に注釈した様に、外気も等しく 0°C 一定の室温に保つための非定常熱負荷と水平面全日射量の測定期間積分の比率 sg_j を比較参考値にした。

模擬測定計算に用いた気象データのうち、助走期間 3 日間を除き、模擬測定値として用いた 6 日間のグラフを Fig.3 に示す。測定模擬計算には直達と拡散の日射が使われる。

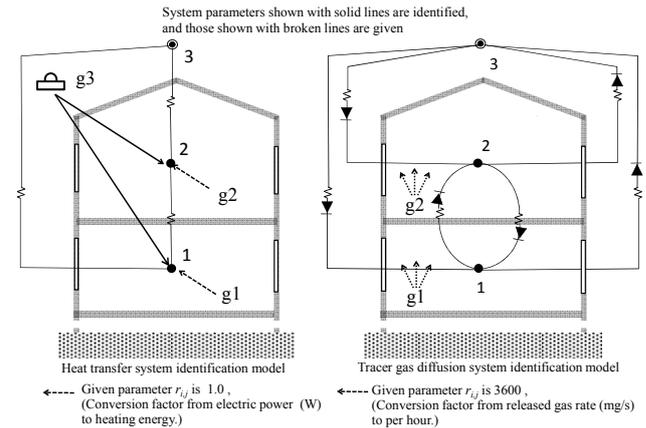


Fig. 2. System identification models

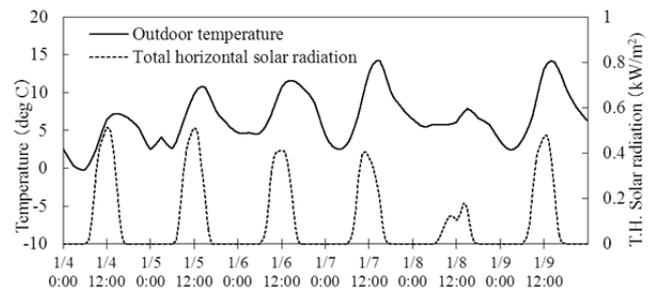


Fig. 3. Outdoor temperature and solar radiation

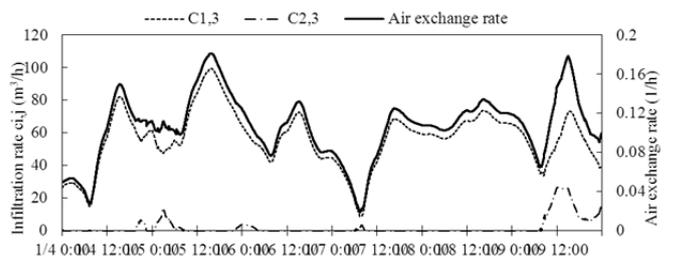


Fig. 4. Air exchange rate and infiltration rates in a wooden building

9. 多数室換気測定のシステム同定の結果

このシステム同定結果は Table2 に示す。隙間風換気量は図 4 の様に大きく変動しているが、その期間平均を良好に推定している。ただし時不変の前提の不適合により β は 1.2 と 1 より大きい。残差からの風量の不確かさを標準偏差は真値からの変動を良く推定している。システム同定結果のモデルによるガス濃度変化の予測計算値と測定値の比較をズレが比較的大きい 2 階について Fig.5 に示す。換気量が小さくなっている区間で大きな違いが生じている。

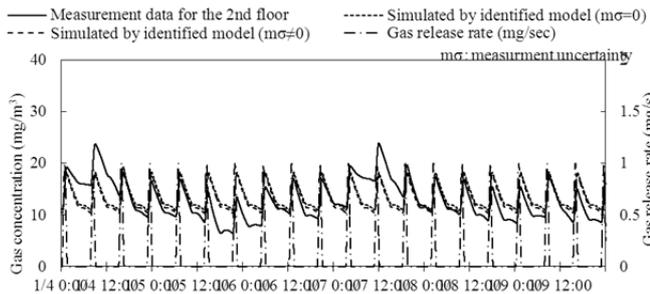


Fig. 5. Tracer gas release and concentration change for second floor in a wooden building

10. 伝熱系システム同定結果

システム同定で得られたモデルで予測計算した室温変動と模擬測定値を木造系モデルと比較したグラフを Fig.6 に示すが良好な一致をしている。Table3 には個々の c_{ij} の真値と推定値および各種不確かさ評価指標を示す。有効熱容量の推定値も全節点の熱容量総和の半分程度であり妥当と思われる。推定熱損失係数 Q は真値より木造で 1.3%、重構造系で 4.5%程度小さいが許容範囲の推定精度と思われる。従って節点数が少なく粗いモデルでも長周期の正弦波励振加熱と長期間のローパスフィルタで測定データを処理することにより良い結果を得られる。

11. 結語

本システム同定理論を改良し妥当性を検証した。また実現現象に比べシステム同定モデルの節点数が少なく粗い場合でも長周期正弦波の励振を作用させ、長期間の移動平均を測定データに施すこと等で良い同定結果が得られる。
 <謝辞> 日本工業検査の益子智久氏には計算プログラム修正等で、清水建設の大西由哲氏には計算機実験で御世話になりました。

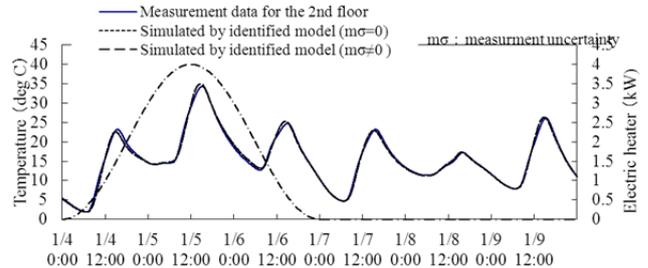


Fig. 6. Comparison of indoor temperature change for second floor in a wooden building

参考文献

- 1) Okuyama H. System identification theory of the thermal network model and an application for multi-chamber airflow measurement. Build Environ 1990;25:349-63.
- 2) Okuyama H, et al. System parameter identification theory and uncertainty analysis methods for multi-zone building heat transfer and infiltration, Building and Environment, 54 (2012), published online: 2 Mar. 2012, pp39-52

Table 2 System identification results for multi-zone infiltration rates measurement

flow rate c_{ij} , capacity m_{ii}	$c_{3,2}$	$c_{3,1}$	$c_{2,3}$	$c_{1,3}$	$c_{2,1}$	$c_{1,2}$	$m_{2,2}$	$m_{1,1}$	A.E.R.	Ave.β		
Term ave. c_{ij} , m_{ii}	57.41	1.323	2.094	56.56	55.58	0	300	250	0.107	-		
Identified results	$\sigma_m=0$	53.29	0	1.92	51.37	53	1.63	291.9	245.4	0.1	-	
	$\sigma_m \neq 0$	55.31	0	3.1	52.21	52.63	0.42	285.2	241.3	0.1	-	
estimated uncertainty standard deviation	$\sigma_m \neq 0$	$r_1\sigma_k$	4.414	7.919	3.86	2.513	6.891	2.396	9.591	5.396	-	-
		$r_2\sigma_k$	14.72	26.44	10.59	8.161	19.64	8.645	23.37	16.02	-	-
		$m\sigma_k$	10.95	19.81	8.87	7.063	16	6.647	21.27	15.16	-	-
β	β	1.344	1.335	1.194	1.155	1.228	1.301	1.099	1.056	-	1.214	
COD	$\sigma_m=0$	0.9641		c_{ij} : flow rate from node-j to node-i (m^3/h), where 3 means outdoor node								
	$\sigma_m \neq 0$	0.9522		m_{ii} : capacity of node-i (m^3), σ_m : measurement uncertainty, A.E.R.: Air Exchange Rate(1/h)								

Table 3 System identification results for thermal performance of a building

Heat transfer system		$c_{3,2}$	$c_{3,1}$	$c_{2,3}$	$c_{1,3}$	$c_{2,1}$	$c_{1,2}$	$m_{1,1}$	$m_{2,2}$	S_{g1}	S_{g2}	ave.β	Q		
True values of parameter		Trans 210.3 Advec 19.23	Trans 207.3 Advec 0.443	Trans 210.3 Advec 0.701	Trans 207.3 Advec 18.94	Trans 174.4 Advec 18.61	Trans 174.4 Advec 0	-	-	10.4	9.51	-	2.186		
Sum of Thansmission and advection		229.5	207.7	211.0	226.2	193.0	174.4	-	-	$r_{1,3}$	$r_{2,3}$	-	-		
Identified results	Wooden	$\sigma_m=0$	206.1	224.6	206.1	224.6	187.4	187.4	3307	3244	9.871	8.954	-	2.153	
		$\sigma_m \neq 0$	205.9	225.4	205.9	225.4	186.7	186.7	3319	3289	9.935	8.932	-	2.156	
	Massive	$\sigma_m=0$	199.7	221.1	199.7	221.1	191	191	7229	6784	9.568	8.621	-	2.104	
		$\sigma_m \neq 0$	198.1	219.7	198.1	219.7	191.6	191.6	7122	6659	9.427	8.457	-	2.089	
Parameter uncertainty and reliability evaluation	Wooden	$\sigma_m=0$	$r_1\sigma_k$	4.325	3.99	4.325	3.99	3.7	3.7	125	135.3	0.335	0.3729	-	-
			$r_2\sigma_k$	37.79	37.41	37.79	37.41	33.05	33.05	1168	1183	3.135	3.259	-	-
		$\sigma_m \neq 0$	$m\sigma_k$	37.92	37.08	37.02	37.08	33.21	33.21	1157	1188	3.107	3.269	-	-
			β	0.997	1.009	0.997	1.009	0.995	0.995	1.01	0.996	1.009	0.997	1.00	-
	Massive	$\sigma_m=0$	$r_1\sigma_k$	17.06	17.43	17.06	17.43	15.53	15.53	1182	1094	1.6	1.571	-	-
			$r_2\sigma_k$	75.26	80.37	75.26	80.37	71.48	71.48	5423	4781	7.38	6.881	-	-
		$\sigma_m \neq 0$	$m\sigma_k$	73.17	78.79	73.17	78.79	69.6	69.6	5318	4649	7.239	6.691	-	-
			β	1.029	1.02	1.029	1.02	1.027	1.027	1.02	1.028	1.02	1.028	1.03	-
COD	Wooden	$\sigma_m=0$	0.994		c_{ij} : generalized conductance from j to i (W/K), where symmetry $c_{ij}=c_{ji}$ is induced, thermal capacity m_{ii} (kJ/K)										
		$\sigma_m \neq 0$	0.9934		S_{g_j} : solar load coefficient (m^2), r_{ij} : solar heat gain coefficient (m^2) of node i from solar heat flux g_j (W/m^2).										
	Massive	$\sigma_m=0$	0.9913		measurement uncertainty $\sigma_m=0$: 0, $\sigma_m \neq 0$: non 0, wooden total node capacity=10080(kJ/K), massive=23016(kJ/K)										
		$\sigma_m \neq 0$	0.9889		$r_1\sigma_k$: parameter uncertainty SD from residual, $m\sigma_k$: parameter uncertainty SD from measurement uncertainty										