

住宅の伝熱と換気と気密性の現場測定法の理論と実験

Theoretical and experimental study of a field measurement method for the thermal, ventilation, and air-tightness performance of residential houses

技術フェロー ○奥山 博康 (神奈川大学) 正会員 吉浦 温雅 (神奈川大学)
非会員 中島 航 (東急コミュニティー)

Hiroyasu OKUYAMA*¹ Atsumasa YOSHIURA*¹ Wataru NAKAJIMA*²

*¹ Kanagawa University *² Tokyu Community Corp.

Synopsis: We have proposed an estimation method based on least squares for the overall heat loss coefficient, equivalent heat capacity, solar heat gain coefficient, infiltration rate, and effective mixing volume of residential houses. In the method, two sinusoidal excitations are supplied: electrical heat and carbon dioxide tracer gas. In this paper, we describe experiments for exploring the optimal excitations. Also the conventional air-tightness measurement method is insufficient for uncertainty evaluation, we have previously defined a reliability evaluation index called the system identification premises non-conformance ratio β . However, this requires the standard deviations of measurement uncertainties. Here, we devised a method to estimate these values by using a moving average and verified it. We also investigated the feasibility of a quadratic equation model that is more rational than the conventional power-law model.

1. はじめに

変動する外気温と日射量に曝された住宅等の実態の熱・換気性能の把握には動的測定法が必要となる。また従来の測定法では、有効熱容量と有効混合容積の推定法および信頼性と不確かさ評価方法も不十分である。これに対し、多数室の一般理論¹⁾と、単室に特化して簡便に同定する理論と表計算ソフトを展開し^{2,4)}、昨年度は熱と換気のシステム同定の励振発生装置の試作器を用いて、可能性実験を行った²⁾。本報では励振とするトレーサガスの炭酸ガス発生と電熱発熱の最適な周期と移動平均の期間等を実験により探った。

建物の気密性は、必要な換気を省エネで効果的に行うため重要であるが、実態の気密性は不明な場合が多く、現場測定法が重要であり、ISO や JIS の測定標準もあるが、信頼性評価と精度の向上等に関する課題が残っており、例えば奥山等³⁾による研究が行われている。風量と差圧の測定不確かさ標準偏差は、システム同定の前提の不適合率 β ³⁾を計算するため必要であるが、従来は、測定器の精度とされる $\pm X\%$ 等の値から仮定していたので、より合理的な推定法が必要である。また現状の基礎式は指数則が用いられているが、水理学で Prony が導いた物理学的な意味が明確な二次式モデルの可能性を検討する。そこで従来よりも多数の測定値を得て、統計的な分析をする方法により検討した。

2. 拡散系システム同定の表計算プログラムの概要

伝熱と換気の測定値に、伝熱測定では9分間、換気測定では5分間の移動平均を施す。こうして得られる変化曲線を測定不確かさ平滑化曲線と呼び、元の測定値との偏差を測定期間で統計分析し測定不確かさ標準偏差を求める(図1)。次に粗いモデルの同定に必要な低周波濾波を目的として、数十分から数時間と比較的に長い移動平均期間 T_m の移動平均を測定値に施す。そして最小二乗法

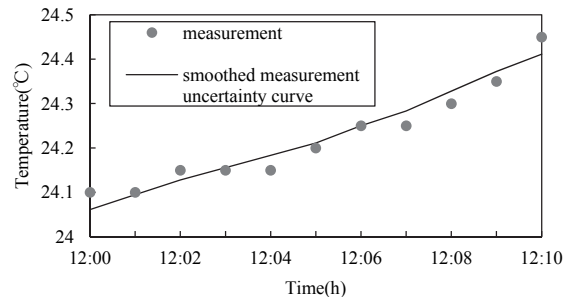


図1 測定不確かさ平滑化曲線と測定値

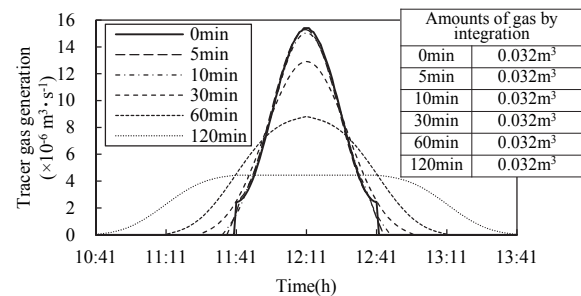


図2 ガス発生量の移動平均期間別の形状

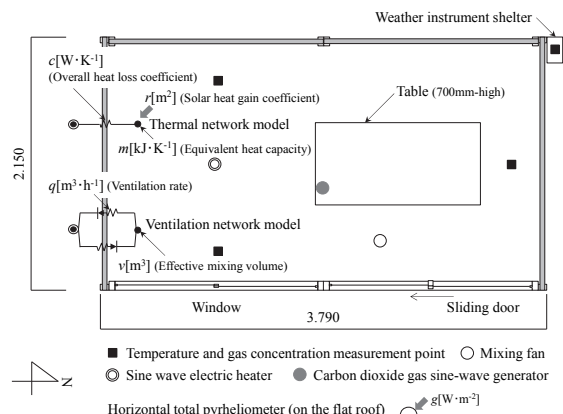


図3 実験建物平面図と同定モデル

によりシステムパラメータ推定を行い、これらの不確か

さ標準偏差と決定係数 COD および同定前提の不適合率 β を求める。図 2 に幾つかの移動平均期間によるガス発生変化曲線を示す。いずれも積算値は $0.032 [m^3]$ で同じだが、正弦波周期 60 分を超えると正弦波形に相似ではなくなる。なお単室の換気のシステム同定理論は既報の論文⁴⁾を参照されたい。

3. 熱・換気性能の測定法の実験の概要

測定対象のプレファブ建物とシステム同定モデル、温度とガス濃度等の超小型データロガーと励振発生装置の配置を図 3 に示す。測定対象の設計上の総合熱損失係数は $53.1 [W/K]$ 、幾何的室容積は $17.8 [m^3]$ である。

3.1 熱性能測定法の実験

同定期間は 12 月 4 日 4 時～12 月 8 日 4 時まで、測定時間間隔も同定間隔も $\Delta t=1 [min]$ とした。電熱器の加熱は昨年度と同じ試作装置により、周期 72 [h]、最大 1008 [W] の正弦波を 1 周期発生させ、室内温湿度、外気温湿度、水平面全日射量、室内電力消費量を測定した。電力消費量は他の電気機器も含めパルス出力電力センサで計測し、記録は他の測定量についても主に超小型データロガーを用いた。

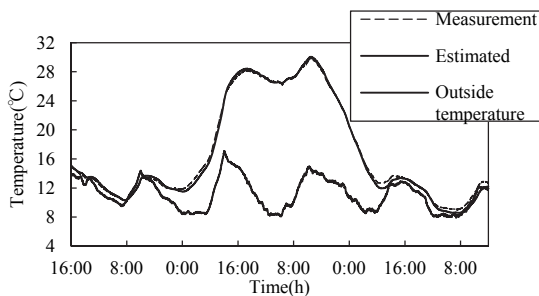


図 4 内外気温変化の実験値と予測値の比較

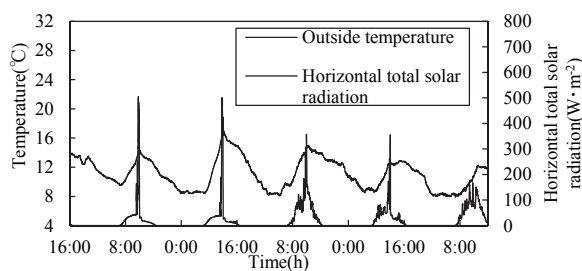


図 5 水平面全日射量と外気温度

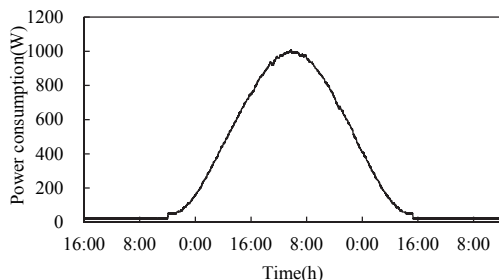


図 6 電熱ヒータの加熱

図 5 には 6 日分の水平面日射量と外気温の変化を示す。

また、図 6 には電熱器を含め室内にある全ての電気機器の消費電力を示す。

3.2 換気性能測定法の実験

本測定法ではトレーサガスの炭酸ガスをアルコール燃焼で発生させる。アルコール流量の正弦波の制御は、シリンジポンプを PC 制御により行う試作装置を用いた。流量 $[ml/min]$ に応じた炭酸ガス発生量 $[l/min]$ は燃焼の化学反応式より $0.60 [l/ml]$ とした。同定期間は炭酸ガスを発生させた後の減衰期間を含めて、11 月 9 日 10 時 41 分～11 月 10 日 15 時 40 分、測定時間間隔も同定間隔も $\Delta t=1 [min]$ とした。この間の内外温度差は平均 $1 [^{\circ}C]$ 程度である。アルコール流量の正弦波は、周期 $60 [min]$ 、最大流量 $1.5 [ml/min]$ の 1 周期を試した。室内と外気の炭酸ガス濃度は超小型データロガーで測定記録した。

4. 熱・換気性能測定法の実験の結果

熱性能測定の結果を表 1 に示す。昨年度と同じく低周波濾波である移動平均の期間を長くするに伴い決定係

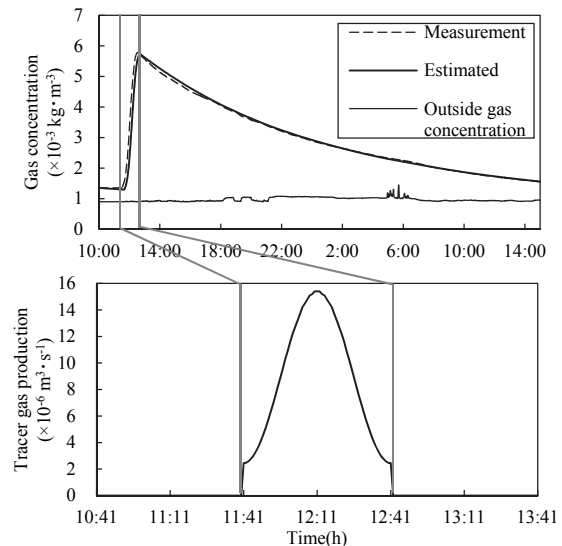


図 7 ガス濃度変化の予測値と実験値およびガス発生量

表 1 熱性能測定法の実験の同定結果

Tmt [min]	m [kJ·K ⁻¹]	c [W·K ⁻¹]	r [m ²]	COD	σ_m [kJ·K ⁻¹]	σ_c [W·K ⁻¹]	σ_r [m ²]	β
0	33.9	53.8	-0.39	0.976	0.42	0.080	0.015	3.3124
5	226.7	54.5	-0.10	0.893	2.75	0.167	0.030	1.0525
10	274.8	54.7	-0.03	0.847	3.33	0.200	0.036	1.0394
30	307.0	54.8	0.02	0.810	3.72	0.223	0.041	1.0360
60	316.7	54.8	0.05	0.798	3.84	0.230	0.042	1.0354
120	322.2	54.8	0.06	0.791	3.91	0.234	0.043	1.0352
480	332.6	54.9	0.11	0.777	4.03	0.241	0.044	1.0349
960	336.3	55.2	0.27	0.772	4.08	0.244	0.045	1.0367
1440	322.8	56.1	0.79	0.779	3.91	0.240	0.044	1.0622

表 2 換気性能測定法の実験の同定結果

Tmv [min]	v [m ³]	q [m ³ ·h ⁻¹]	COD	σ_v [m ³]	σ_q [m ³ ·h ⁻¹]	β
0	12.8	1.06	0.942	0.077	0.033	1.11864
5	13.4	1.06	0.940	0.078	0.034	1.08718
10	13.5	1.06	0.939	0.078	0.034	1.08659
30	13.5	1.07	0.939	0.079	0.034	1.08604
60	13.6	1.08	0.938	0.079	0.034	1.08602
120	13.7	1.09	0.937	0.080	0.034	1.08692

数は小さくなるが、日射熱取得係数以外は、あまり大きな変化はない。最適移動平均期間は不適合率 β が最小に

なる8時間であり、既報¹⁾の計算機実験結果と同じである。換気測定の結果を表2に示す。移動平均期間を長くする程に決定係数は小さくなる。不適合率 β は60分で最小となっているので、本件での最適期間と考えられる。これらの最適の同定結果は、設計上の総合熱損失係数と幾何的室容積に近い値である。また同定されたパラメータで予測計算モデルを作りシミュレーションを行った。予測室温と測定室温、予測ガス濃度と測定ガス濃度の比較を図4と図7に示す。これらの予測値は実験値を良好にトレースしている。

5. 気密性測定の表計算プログラムの概要

5.1 移動平均曲線による測定不確かさ推定

表計算は最大200組の差圧と風量の測定値を処理可能とした。図8には測定点と移動平均折れ線の一部を描いた。差圧の測定不確かさを推定する方法を、移動平均個数が10個の場合を例にとり説明する。風量 q を横軸に、差圧 Δp を縦軸にとり、風量の大小順に測定点をプロットする。風量が最小の a 点から10個目の b までの風量と差圧のそれぞれの平均値を計算し、これにより移動平均点 c をプロットする。次に2番目に小さい d 点から10個目の e 点までの平均値を計算し f 点をプロットする。この手順を、風量が最大の点が移動平均に含まれるまで繰り返す。こうして移動平均点を折れ線で結ぶ曲線が描かれる。この移動平均曲線の範囲は、測定点の分布範囲よりも狭くなる。この曲線を測定不確かさ平滑化曲線とも呼ぶ。この曲線と測定点の間で差圧軸方向の偏差が取れる測定点については、全ての偏差を用いて標準偏差 $\sigma_{\Delta p}$ を計算する。この図では偏差が取れる最小の測定点は g である。次に偏差が取れる測定点は h である。点 h と偏差が取れる移動平均曲線の区間は、点 i と点 j を結ぶ線分で計算できる。この区間内を比例配分の計算をすることで、折れ線上の点 k が得られる。そして点 k と測定点 h の間で偏差 l が計算できる。一方、風量については、横軸は差圧に、縦軸は風量にして、同様な手順を繰り返し、風量測定の標準偏差 σ_q を計算する。以上をアルゴリズムにして表計算に組み込んでいる。

5.2 最小二乗法推定の不確かさと信頼性評価

基本的な理論は既報³⁾に述べている。biweight法の重みが有りと、普通の無しの二種の最小二乗法を用いて、ISO式とJIS式の従来の指数則モデル、さらにProny式とも呼ぶ二次式モデルの其々2種のパラメータを推定する。ここにbiweight法の重み付き最小二乗法では繰り返し収束計算となる。なおISO式は具体的には $q=C \cdot \Delta p^n$ 、JIS式では $\Delta p=D \cdot q^n$ 、Prony式では $\Delta p=Di \cdot q^2+Dv \cdot q$ と表せる。そして標準法の信頼区間等の算出をするだけでなく、回帰式残差からの不確かさ伝播として得られた推定パラメータの不確かさ標準偏差 σ_C 、 σ_p 、 σ_D と σ_n を求め、

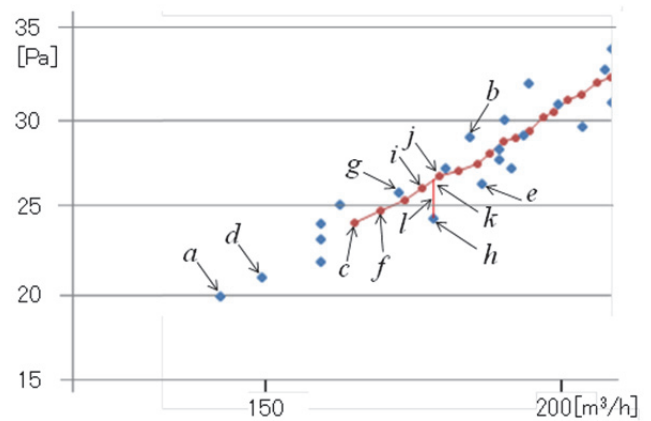


図8 移動平均曲線による測定不確かさ推定

一方、測定不確かさだけからの伝播としてのパラメータの不確かさ標準偏差 $m\sigma_C$ 、 $m\sigma_p$ 、 $m\sigma_D$ と $m\sigma_n$ も求める。後者の標準偏差に対し前者の比率 $\sigma/m\sigma$ が前提の不適合率 β であり、信頼性評価指標とするが、通常決定係数 COD も算出する。指標 β は1程度か多少小さいぐらいが正常と考えられる。測定の前提とは、推定パラメータの時間不変性や回帰式の構造的適合性等を意味する。従って圧力差によって隙間の大きさが変化したり、外風圧の変動が大きければ β は1よりもかなり大きくなることが予想され、実際に数値実験で確かめている³⁾。ただし今回の実験ではこうした状況は見られなかった。なお指数則モデルでは回帰が対数尺度で行われることもあり、決定係数では判断し難い³⁾。

6. 気密性測定法の実験の概要

横浜キャンパス内に設置した床面積約8m²の小規模プレファブ建物に市販の気密性測定装置を取り付けて測定した。予備測定により気密性が悪いことが分かり、窓と戸と隅部等にテープで目張りを行い、隙間を減らした。現状の気密測定装置は沢山の多点自動測定が困難なので、手で100点程を測定したが、各測定点の間は定常に近づく様に数分間置いた。本報の測定日は2015年10月2日で、室温は27°C、外気温度は25°Cで、内外温度差は約2°Cであった。

7. 気密性測定不確かさの推定法の実験結果と考察

内外差圧を25 Paから75 Paの範囲で測定した。前述した様な移動平均曲線を測定点10個ずつで作った場合を図9に示す。移動平均曲線は変化性状を表現するため、なるべく少ない個数で曲線を得ることが望ましい。図10と11を見ると、移動平均個数が10個より多くても、測定不確かさ標準偏差は大きく変化しない。従って本測定では、またおそらく一般的にも、10個程度が必要最小限で最適な移動平均個数と思われる。表3に5個と20個の場合を含め測定不確かさを示す。

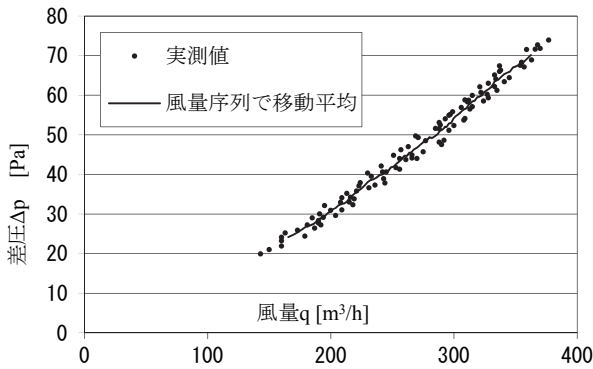


図9 測定点と10個ずつの移動平均曲線

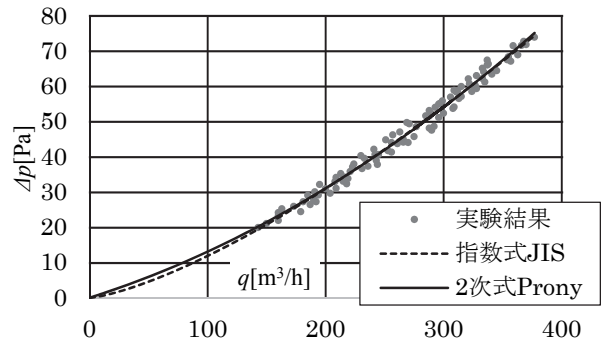


図12 指数則式と二次式の回帰式と測定値の比較

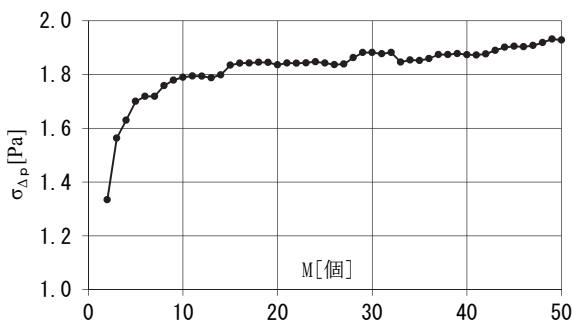


図10 差圧測定不確かさ標準偏差と移動平均個数 M

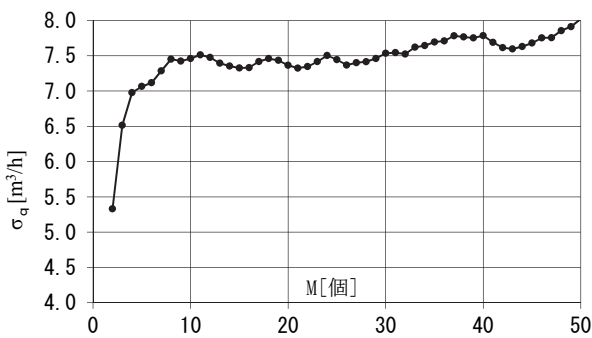


図11 風量測定不確かさ標準偏差と移動平均個数 M

表3 移動平均個数による測定不確かさ

	5 個	10 個	20 個
$\sigma_{\Delta p}$ [Pa]	1.700	1.790	1.836
σ_q [m³/h]	7.065	7.460	7.365

8. 指数則と二次式モデルの違いの検討と考察

同じ測定データにより、指数則式と二次式の2種類の回帰式の適合度を検討した。図12に示す両回帰式は、実際の隙間風が起こる微差圧で比較的大きな違いを示す。指数則式は差圧0での微分係数が0になる特徴がある。これらの回帰式の推定係数と信頼性の評価指標を表2に示す。適合度の優劣を不適合率 β や決定係数CODで比較しても明確な違いが表れていないのは、重要な微差圧域での検討ができなかったことが大きな原因と思われる。

ここで相当隙間面積を a [m²]とする。指数則 $\Delta p = (\rho/2)(q/(3600a))^n$ から $a = (1/3600)(\rho/(2D))^{1/n}$ である。従って $a = 32.0 \times 10^{-4}$ [m²] = 32.0 [cm²]となる。

表4 指数則式と二次式の回帰係数・指数と信頼性評価指標

	指数則モデル $\Delta p = D \cdot q^n$		二次式(Prony)モデル	
	D	n	D_i 動圧	D_v 摩擦
推定値	0.0205743	1.38079	0.00024863	0.105270
不適合率 β	0.935440	0.568757	0.602213	0.602707
決定係数	0.987397		0.987197	

一方、二次式モデル $\Delta p = D_i \cdot q^2 + D_v \cdot q$ で本間⁵⁾等の式を参考にすると、 $a = (1/3600)(27 \cdot \rho / (35 \cdot D_i))^{1/2}$ であるから、 $a = 169 \times 10^{-4}$ [m²] = 169 [cm²]となり、相当隙間面積が大きく異なる。本間が導いた q の2次の項⁵⁾は運動エネルギーの隙間断面での積分値であり、形状圧力損失係数を乗じる必要性等の再検討が必要と思われる。

9. まとめ

昨年度の励振は2周期に対して、今年度は1周期なので、比較的に変化は少ないにも関わらず、単室モデルでは良い結果が得られた。低周波濾波の移動平均期間は、伝熱系では8時間、換気系ではガス発生の一周期60分となった。測定不確かさを移動平均を利用して求める方法を考案し実験で確かめた。今後は、従来の指数則式に対して、二次式モデルの可能性を検討していきたい。

【謝辞】 気密性測定法の実験と測定データ分析は、神奈川大学2015年度の卒業研究として、山崎一二三と瀧田湧基が行った。

参考文献

- 1) Okuyama H, Onishi Y., System parameter identification theory and uncertainty analysis methods for multi-zone building heat transfer and infiltration, Building and Environment, Elsevier, Vol.54, pp39-52 (2012)
- 2) 奥山博康, 吉浦温雅, 菅野康介, 住宅の熱・換気性能現場測定法の理論と可能性実験, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会論文集, A-62, p49-52, 2015年9月
- 3) Okuyama H, Onishi Y., Reconsideration of parameter estimation and reliability evaluation methods for building airtightness measurement using fan pressurization, Building and Environment, vol. 47, pp373-384 (2012)
- 4) Okuyama H, Onishi Y. Uncertainty analysis and optimum concentration decay term for air exchange rate measurements: Estimation methods for effective volume and infiltration rate. Building and Environment, Elsevier, Vol 49, 2012, pp182-192.
- 5) 本間宏, 建築壁体すきまの通気量計算式中の指数項について, 日本建築学会論文報告集, 78号, 1984年1月, pp67-78