

多数室換気測定法と簡易換気測定法の実験的な研究

Experimental Study of a Multi-Zonal Ventilation Measurement Method and Simple Ventilation Measurement Method

正会員 ○吉浦 温雅 (神奈川県立大学) 技術フェロー 奥山 博康 (神奈川県立大学)

非会員 中谷 剛 (旭化成ホームズ株式会社)

Atsumasa YOSHIURA*¹ Hiroyasu OKUYAMA*¹ Tsuyoshi NAKATANI*²*¹ Kanagawa University *² Asahi Kasei Homes Corporation.

Synopsis: First, we investigated the optimal tracer gas supply method in our multi-zonal ventilation measurement system through measurements and computational simulations. Second, we investigated a simple measurement method involving generation of carbon dioxide gas by solid alcohol combustion through measurements and computational simulations. In the first investigation, we found that a sufficiently long decay time of gas concentration was necessary between gas supply periods. In the second investigation, we found that assuming constant gas emission and taking the moving average of the combustion period enabled appropriate estimation of ventilation flow rate and effective mixing volume without the need to measure gas generated by combustion.

1. はじめに

現状のトレーサガスを用いた換気測定法は、主に単室扱いのものが実用されており、多数室の換気測定法として一定濃度法等はあるが、室間の風量把握は困難である。本システム同定理論では、断続的な正弦波形の炭酸ガス流量の励振を与え、各室のガス濃度変化の応答を測定する。これらの供給ガス流量と濃度変化の測定値に最小二乗法を適用して、各室と外気および室間の相互風量だけでなく、各室の有効混合容積も推定することができる。既報において、本システムの動作確認を主目的とした実験を横浜市の集合住宅で行った。しかし、トレーサガス供給における流量、周期、供給停止の減衰期間の取り方など、最適な供給法の検討が課題となった。

一方で、トレーサガスを用いた換気量の測定において、より簡便なガス発生法を用いた、換気量だけでなく有効混合容積も同時に測定する方法の可能性を探る。数年来、液体アルコールをシリンジで流量制御し、燃焼により炭酸ガスを発生する方法²⁾を検討していたが、反って複雑になった。今度は、卓上の小鍋等の加熱に用いる市販の固形アルコール燃料を利用する方法を試す。約二十分の燃焼中のガス発生量は変動するが、ガス発生総量は正確に把握できるので、これを矩形波的な一定量発生と仮定しても、燃焼時間程度の移動平均を施してシステム同定すれば、実用的な精度は得られると期待される。

そこで本報の前半では、三室の実験的建物を対象として、換気測定と計算機での模擬測定を行い、最適なトレ

表-1 実験棟概要

所在地	静岡県富士市
構造・階数	鉄骨造・平屋
延べ床面積	20.09m ²

表-2 各室の床面積と気積

	大洋室①	小洋室②	小洋室③
面積(m ²)	13.40	3.35	3.35
気積(m ³)	31.09	7.51	7.51

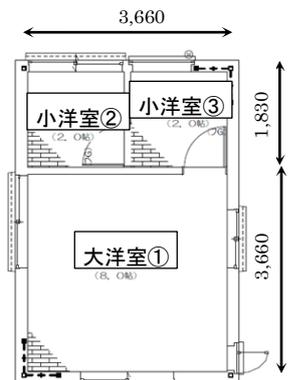


図-1 実験棟平面図

ーサガスの供給法について検討する。また本報の後半では、固形アルコール燃焼による炭酸ガス発生を利用する簡易測定法について、炭酸ガス発生量の測定と計算機での模擬の換気測定を行い、その精度を検討する。

2. システム同定の表計算プログラム SPIDS

本システム同定理論³⁾では、熱回路モデルから始まって、ガス流動を含めた一般的な拡散系のシステムパラメータを同様な記号で示している。室を節点番号で表し、 j 室から i 室への風量 c_{ij} とし、逆方向は c_{ji} とする。また、 j 室の有効混合容積を m_{ji} と表す。最小二乗法により、2種類のシステムパラメータ推定を行い、決定係数CODも求める。さらに得られた常微分方程式での残差を利用して、パラメータの不確かさ標準偏差 σ_c, σ_m を求め、同定前提の不適合率 β も計算している。

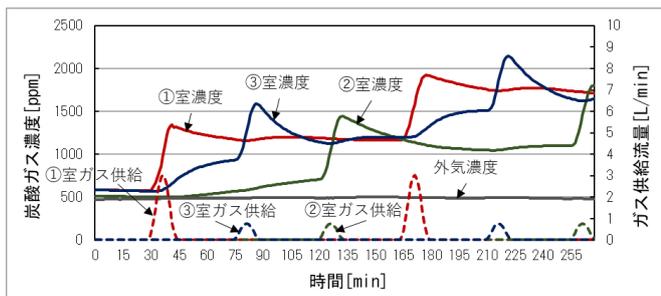


図-2 隙間風換気状態での各室の励振と濃度変化

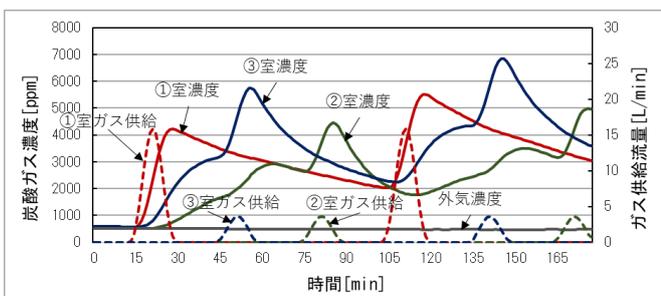


図-3 第三種換気状態での各室の励振と濃度変化

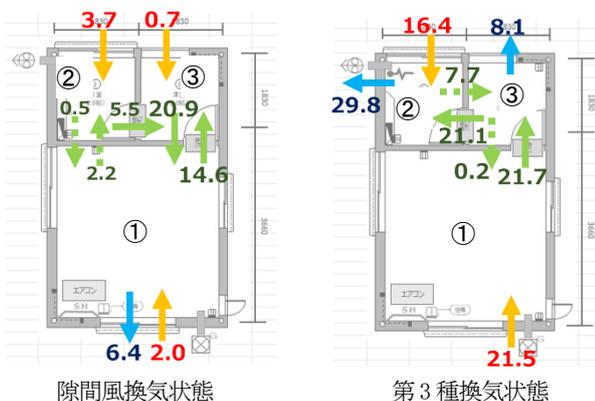


図-4 システム同定による室間風量[m³/h]

3. 多数室換気測定法の実験

3.1 換気測定の実験概要

実験は静岡県富士市にある平屋建ての実験棟(20.09m²)を利用し、2019年12月に実施した。実験棟は洋室①～③の三室からなる(洋室②と③は同じ床面積)。表1に実験棟概要、表2に各室の床面積と気積、図1に実験棟平面図を示す。実験は、隙間風換気状態と第三種換気状態の二つの状況で行った。測定するゾーンは大洋室①、小洋室②、小洋室③の三室と外気を含む4ゾーンとした。第三種換気状態では、小洋室②から機械排気し、大洋室①に給気口を設けた。隙間風換気状態では、それぞれの給排気口を塞いだ。ガス供給は、既往研究⁴⁾で奥山により検討されたガス供給スケジュールに基づいた。大洋室①→小洋室③→小洋室②の順でガスを供給し、2周期を繰り返し測定した。ガス供給による励振の期間は15分、励振間での減衰期間は隙間風換気で30分、第三種換気では減衰期間を15分設けて行った。温度差換気を促進するため、大洋室①ではヒーターを使用し、内外温度差を17度とした。

表-3 システム同定による有効混合容積(実測)

容積(m ³)	m _{1,1}	m _{2,2}	m _{3,3}
隙間風換気	26.34	7.15	6.92
第三種換気	30.88	7.52	6.06

表-4 システム同定による決定係数と不適合率(実測)

	決定係数COD	不適合率β
隙間風換気状態	0.938	1.894
第三種換気状態	0.987	0.582

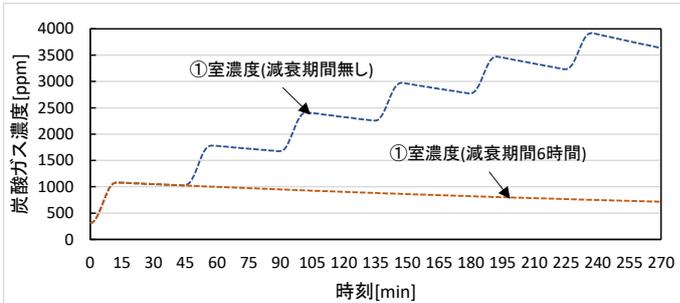


図-5 減衰期間の設け方による濃度変化(模擬測定)

表-5 システム同定による決定係数と不適合率(模擬測定)

		決定係数COD	不適合率β
隙間風換気状態	減衰期間無し	0.969	0.47
	減衰期間6時間	0.983	0.17
第三種換気状態	減衰期間無し	0.974	0.27
	減衰期間6時間	0.985	0.18

3.2 換気測定の実験結果

測定による各室の励振と濃度変化を図2と図3、SPIDSのシステム同定による室間風量を図4に示す。各室での濃度変化を見ると、隙間風換気では、ほとんど減衰せず、第三種換気では、想定よりも減衰がかなり遅かった。また、システム同定結果においては、第三種換気状態での実験で、小洋室③からもガスが排気されている。本来ならば、小洋室②にある排気口から全て排気されることが理想的であるが、そのような結果になっていない。実験により得られた結果に基づき求めた有効混合容積を表3、決定係数CODと不適合率βを表4に示す。隙間風換気状態に比べ、第三種換気状態ではCOD、βともに良いが、さらなる測定精度の向上が必要と考える。

3.3 模擬測定によるガス供給停止期間の効果の検討

実測に並行し、熱・換気回路網予測計算プログラムNETSによる計算結果を模擬測定値とし、SPIDSによるシステム同定を行った。まずは、隙間風換気状態で、励振の期間15分、減衰期間は設けずに模擬測定を行った。結果は絶え間なくガス供給を続けることで濃度が上昇し、室内の濃度はなかなか減衰しない。これは実測と同様の結果である。この結果から、励振間の減衰期間を多く設けることが必要と考え、減衰期間を6時間設けて模擬測定を再度行ったところ、濃度が十分に減衰することが分かった。この場合の大洋室①での濃度変化を図5に示す。小

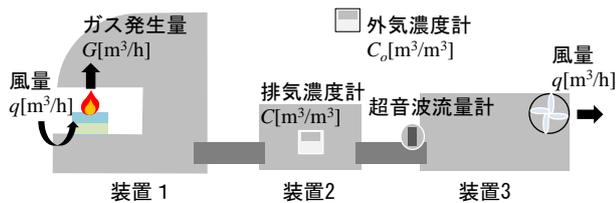


図-6 炭酸ガス発生量測定装置の全体図



図-7 測定装置, 装置 1(左), 装置 2(右上), 装置 3(右下)

洋室②と③も同様であった。

また、これらの模擬測定値からシステム同定を行った結果を表 5 で示す。隙間風換気状態において、減衰期間を与えない場合の決定係数 COD は 0.969 で、励振間に減衰期間を 6 時間設けた場合の COD は 0.983 と良くなった。同様に第三種換気状態の検討においても、減衰期間が無い場合の COD は 0.974 で、6 時間の減衰期間を設けると 0.985 となった。従って濃度減衰法での最適減衰時間³⁾程度にすることで、良い同定結果が得られると思われる。

4. 簡易換気測定法の実験

4.1 炭酸ガス発生量の測定装置

燃焼ガスを、一定風量のダクトで排気し、途中の風量とガス濃度を計ることでガスの収支式からガス発生量が把握できる。図 6 と 7 の装置 1 では、燃焼ガスをフードで捕集し、装置内に螺旋状に収めたダクトを通して冷却する。実験時には、燃焼空気が外部に漏れないようにフードからアルミ箔を垂らし燃焼体を囲んだ。装置 2 は炭酸ガス濃度計を入れた箱である。この箱を通過した後で、整流管を通り、超音波流量計で測定した後に、送風機を通して排気される。

4.2 炭酸ガス発生量変化の測定実験

室内で実験を行うと、測定装置周りの炭酸ガス濃度が上昇し、適切な測定が行えない。従って屋外で実験を行ったが、燃焼とフード捕集が外部風で乱されないように、装置 1 だけはプレファブ小屋の中に置き、装置 2 と装置 3 は外気に設置した。炭酸ガス濃度は 1 分間隔の自動計測記録なので、燃焼時間の前後に十分な時間を設けて連続

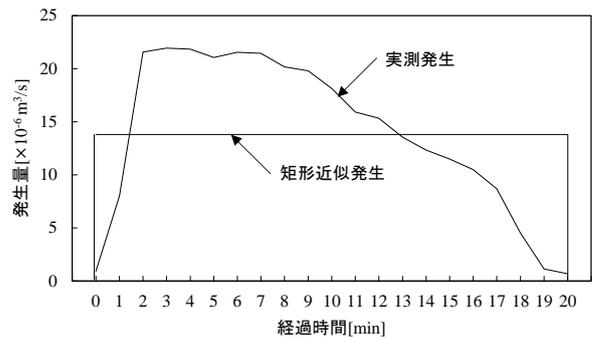


図-8 実験 2 回目の炭酸ガス発生量の変化

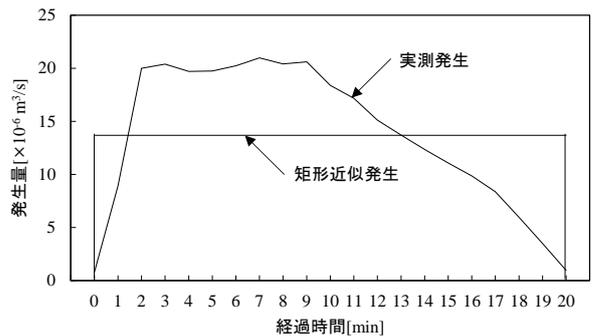
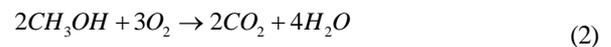


図-9 実験 3 回目の炭酸ガス発生量の変化

測定した。送風機も一定風量で回し続けたが、超音波流量計の記録計が利用できず、液晶表示の風量はカメラで記録した。燃焼終了は目視で確認して時刻を記録した。本装置系でのガス収支式から、ガス発生流量 G [m³/h] を計算する(1)式が書ける。これに 1 分間隔の測定排気濃度 C [m³/m³]、外気濃度 C_o [m³/m³]、排気風量 q [m³/h] を代入して発生量を計算した。

$$G = q \cdot (C - C_o) \quad (1)$$

一方、燃焼の化学変化の(2)式が書ける。固形燃料の 25g 全てがメタノールと仮定すると、メタノール 1 mol から炭酸ガス 1 mol が発生することが分る。分子量はメタノール=32、二酸化炭素=44 であるから、固形燃料 25g から炭酸ガス体積量は、 $(25/32)\text{mol} \times 22.4\text{L}/1000\text{m}^3 = 0.0175\text{m}^3$ 、質量では $(25/32)\text{mol} \times 44 = 34.375\text{g}$ 発生する。



4.3 炭酸ガス発生量変化の実験結果

実験は 3 回行ったが、ほぼ同様な発生量変化であった。1 回目はフード捕集漏れが未対策だった。(1)式から求まる実験 2 回目と 3 回目の発生量の推移を図 8 と 9 に示す。燃焼開始後に発生量は、 $20 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ 程度まで上昇し、10 分後から下降し始め、20 分後に燃焼が終わり、ガス発生は終了している。(1)式から求めた実験 2 回目のガス発生流量を 1 分の時間間隔で台形積分した面積から発生総量を求めると 0.0174m^3 となった。これは燃料の質量から予想される前述の発生量の約 99% である。この発生総量

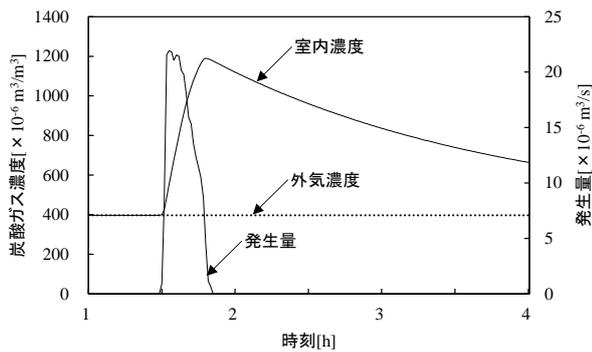


図-10 実測のガス発生量と模擬測定室内濃度の変化

と等しい矩形波の一定発生流量としたものを図8と9中に示す。

4.4 移動平均処理の効果の検討

矩形波の一定発生流量に施す移動平均処理の効果について検討した。単室で第1種の換気量が $10\text{m}^3/\text{h}$ と、有効混合容積は 20m^3 のモデルに、実験2回目の実測の発生量を与え、熱・換気回路網モデル計算プログラムNETSにより、室内濃度の模擬測定値を計算した。この室内濃度と外気濃度と矩形近似または実測の発生量をシステム同定の表計算プログラムSPIDSに与え、3種の期間の移動平均を施して、システム同定をした。それぞれの移動平均処理について、得られた換気量と有効混合容積の同定結果を比較した。

図10には実測ガス発生量と模擬測定室内濃度の結果を示す。これに移動平均処理後の模擬測定値を図11に示す。図12は矩形近似のガス発生について、移動平均処理後のものである。表6のシステム同定の結果を見ると、実測のガス発生量によるシステム同定結果は移動平均の長さに関わらず正解の換気量と有効混合容積に近いが、矩形近似の発生でも、20分と30分の移動平均をすることで正解値に近くなる。また実測のガス発生量でも、移動平均期間が長い程にCODの向上が少し確認できる。次に矩形近似発生のCODは、移動平均期間が長い程に向上し、30分では0.970になる。システム同定前提の不適合率 β は、移動平均無しに比べ移動平均期間が長い程に増大するが、矩形近似発生の β は実測発生の β に比べ大きいので、不適合を検出している。

5. まとめ

本システム同定理論による多数室換気測定のトレーサガスの供給は、換気回数が小さい場合には、複数回のガスの供給の間に十分に長い減衰時間が必要なが分かった。固形アルコール燃焼による炭酸ガス発生を利用する簡易測定法は、燃焼によるガス発生変動を測定しなくとも、一定発生と仮定して、かつ燃焼時間の移動平均処理を施せば、正確に換気量と有効混合容積の推定が行えることが分かった。今後は本簡易測定法を、実際の建物でも実験する必要がある。

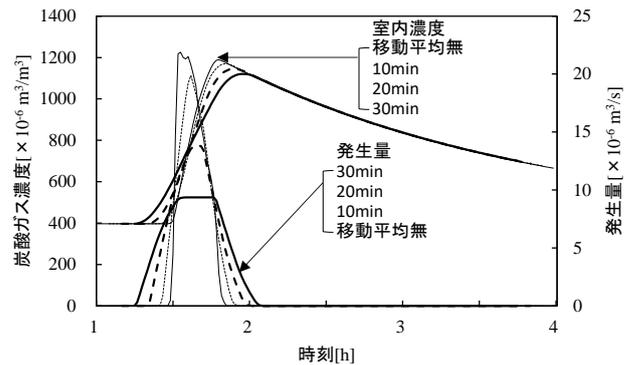


図-11 実測発生で室内濃度変化の模擬測定値に移動平均処理

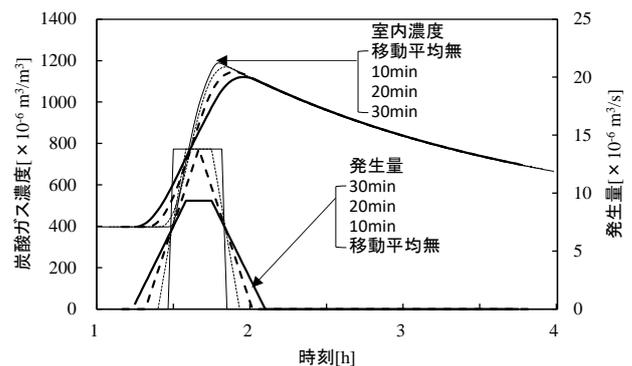


図-12 矩形発生で室内濃度変化の模擬測定値に移動平均処理

表-6 換気量と有効混合容積のシステム同定の結果

移動平均の期間	矩形近似ガス発生				実測ガス発生			
	Q[m ³ /h]		V[m ³]		Q[m ³ /h]		V[m ³]	
	正解値10	正解値20	COD	β	正解値10	正解値20	COD	β
移動平均無	11.46	15.16	0.805	0.88	10.26	19.77	0.989	0.87
10min	11.22	16.48	0.900	0.91	10.19	19.91	0.996	0.89
20min	10.84	17.95	0.955	0.94	10.14	19.95	0.998	0.92
30min	10.62	18.56	0.970	0.97	10.11	19.96	0.999	0.95

謝辞

小規模実験建物でのトレーサガスの供給方法についての検討は、神奈川大学と旭化成ホームズ株式会社の共同研究で実施した。なお、神奈川大学の当時卒研生 市川海の検討結果も含まれる。簡易測定法については、嶋崎亮の卒業研究として行われた実験と計算をもとに、修正し拡張して改良したものです。

参考文献

- 1) 井出大輝ら, 多数室建物の熱・換気性能現場測定システムの動作確認実験 その2 換気性能測定 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, pp367-368
- 2) 奥山博康, 菅野康介, 熱・換気性能現場測定法の小規模建物での可能性実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015年9月, 87-88
- 3) Hiroyasu Okuyama, Yoshinori Onishi, System parameter identification theory and uncertainty analysis methods for multi-zone building heat transfer and infiltration, Building and Environment, Vol54, 2012, pp39-52
- 4) Hiroyasu Okuyama, Yoshinori Onishi, Uncertainty analysis and optimum concentration decay term for air exchange rate measurements: Estimation methods for effective volume and infiltration rate, Building and Environment, Elsevier, 49 (2012), pp182-192