換気量既知の試験住宅を用いた多種トレーサーガス法の検証

EVALUATION OF THE MULTIPLE TRACER GAS TECHNIQUE IN
AN ACTUAL-SIZED TEST HOUSE WITH KNOWN AIRFLOW RATES

絵内正道*, 澤地孝男**, 島田 潔***, 福島史幸***, 瀬戸裕直****

Masamichi ENAI, Takao SAWACHI, Kiyoshi SHIMADA,

Fumiyuki FUKUSHIMA and Hironao SETO

The interzonal airflow rates in an actual-sized test house were measured by using the multiple tracer gas technique. Cylinders were installed within the walls of the test house so that the volume of infiltrated and exfiltrated air-leakage could be varied.

1. The values obtained by the multiple tracer gas technique had errors of 20% to 30%, but the degrees of accuracy in the case of 4-zone model and 5-zone model were similar to those for a 2-zone model and 3-zone shown in previous reports.
2. When the degree of airtightness was low (e.g., $5 \text{ cm}^2/\text{m}^2$), the calculated airflows were less than those in other tests.
3. The calculated results are almost equal between 4-zone model and 5-zone model even if the volume of the interconnected space, such as stairs, is not considered in the calculation of airflow rates between zones.

Keywords: multiple tracer gas technique, modeling, interzonal airflows, multi-zone model, pressure difference

多種トレーサーガス法, モデリング, 室間換気量, 多数室モデル, 差圧

1. はじめに (研究の背景と目的)

単一ガスによる多数室換気の測定はこれまでも数多く行われてきた^{1), 2), 7)}。また, 多種トレーサーガス法においても2室~3室モデルを対象に, ガスの放出方法, 妥当な算定時刻, モデリング, 算定式などの基礎的な検討が行われてきたが^{3), 4)}, 実験室実験を除き, 換気量既知の実家屋を対象に厳密な精度検証がその都度行われてきた訳ではない。トレーサーが4種ガスに広がった現時点で従前の知見を踏まえながら, 内外差圧測定装置等が付設された実験住宅を用いて多種トレーサーガス法の精度的な検証を行うことは, 今後の測定結果の拠所となるに違いない。また, 高気密化住宅の普及が著しい北海道にあって, パッシブ換気も有用な空気環境計画手法の一つであると考えられるようになってきた。

本論文の目的は, それらを踏まえ, 換気量既知の試験住宅を用いて, ①各居室の換気量と換気経路の実体把握を可能にする多種トレーサーガス法の精度的な検証を行い, 測定結果の妥当性を把握することと, ②4室を超えた空間を実体容積なしの換気連絡路と仮想した室間換気量測定の可能性の有無を検討することにある。

2. 実測の概要

2-1 多種トレーサーガス法

多種トレーサーガス法では, 複数の測定対象空間で複数のガス濃度が同時刻的に得られた場合, 内外温度差や風速等の換気動力が時間的に変動しても室間換気量や各室外気流入分配率を変動現象として解析可能と考えられている。しかし, 対象室毎のガス濃度収支を

基本としたトレーサーガス法の場合, 各測定対象室毎の瞬時一様拡散が大前提であり, 従前から妥当なガス濃度の測定と算定に関わって推定精度の検討を行ってきた⁵⁾。それ故, 如何に瞬時一様拡散が大前提であっても, 強力な拡散混合ファンを使用することは, 温度差による室間換気の実情を阻害する要因となるので, 避けることが望ましい⁶⁾。本論文では, 混合ファンを使用せず, ガス放出口での拡散小ファンのみを用い, 対象空間の環境特性に応じた室間換気量と換気経路を検討した。

2-2 シリンダーハウス

建設省・建築研究所の人工気象室(室規模: 間口12・奥行13・室高9[m], 外気導入量: 400 [m^3/min])内に建設された実大試験住宅の平面をFig. 1に示す。2階建て住宅・延床面積約66 [m^2]で, その最大の特徴は, 外界の温度変動や風速変動の影響を全く受けないこと, 任意に内外温度差の設定ができること, Fig. 2に示す内径50[mm]長さ375[mm]の直管のノーマルシリンダー及びその直管の中にスリット状の細片を組み込んだスリットシリンダーの開・閉によって, 外界と室間の隙間の配置とその面積(気密性能)を任意に設定できること, 各シリンダーの内外差圧から通過風量(換気量)を計測できる¹¹⁾ことにある。それ故, 同試験住宅は”シリンダーハウス”とも呼称されている。

2-3 実測条件の設定

実測の主目的が多種トレーサーガス法の精度検定にあるため, 4

* 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博

** 建設省建築研究所 室長・工博

*** 北海道大学大学院工学研究科 大学院生

**** 建設省建築研究所 主任研究員

Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.
Building Research Institute, Ministry of Construction, Dr. Eng.
Graduate School of Engineering, Hokkaido University
Building Research Institute, Ministry of Construction

Fig. 1 Floor plans of test house called Cylinder House

室や5室のモデル化が容易な様に、DKとUtilityの間のドアを開放し、両空間を併せて1室化した。壁隙間の開口は2F最上と1F最下位置を開放し(h=6040[mm])、基本的に北海道の独立住宅の使用状況と気密性能水準を想定した。また、差圧¹⁾は圧力差変動を10秒間隔で測定し、4分間の平均値からシリンダー通過風量(換気量)に換算した。隙間開口はノーマルシリンダーのみで模擬を行った。その設定条件をTable 1に示す。

換気方式： ①内外温度差を動力とする自然換気
②1F・DKから排気する機械換気 の2種。

内外温度差：試験住宅の室温を一律25[℃]に設定(熱負荷に応じ、1, 2台の赤外線暖房機(出力1[kW])を外壁から1m離して中央に向け設置)

①人工気象室温-5[℃]の時の30[deg]
② 同室温15[℃]の時の10[deg] の2種。

気密性能： ①床面積当りの相当開口面積1 [cm²/m²]
② 5 [cm²/m²] の2種。

生活条件： ①内部ドア開
② ドア閉 の2種。

(注) 室間ドアのアンダーカットは内径160 [mm]の円形開口(有効開口面積163 cm²)で模擬し、室内温度の制御はサーモスタットのon-offで行ったが、変動幅は±0.3℃以内に納まり、定常状態は十分に確保されている。また、実験住宅の外壁は発泡ポリスチレン100 [mm]、Low-eペアガラスで断熱されているため、居室

の温度むらは内外温度差30degの場合でその1割未満である。

2-4 測定システム

トレーサガスとして、CH₄、N₂O、SF₆、HFC134aの4種を用いた。上記4種ガスを各1種毎にBN、BS、LV、DKへマスフローコントローラー(1%FS)を介して一定(0.003[m³/h])供給し、室の中央・1/2高さのガス放出口では、放出口位置に取り付けた小ファン(AC100V/14W φ:110[mm])のみを用いて混合拡散の促進を図っている。なお、階段室では、4種ガスの供給停止後、ガス濃度が十分に希釈・減少したのを確認し、4種ガスの一つを一定供給し、その濃度変動を5種目のガス濃度変動情報と考えた。

ガス濃度の測定は、室の1/2高さの位置で各壁面近傍に2管・計8管を1点に集約、各測定対象室毎に1点で4点、階段室の上下で2点、人工気象室内(外気相当)の2点、計8点で行なった。1測定点につき8本の接続端子を有するセルに管長を等しくしたビニールチューブを装着し(Manifold Sampling)、各測定対象空間の容積平均濃度が得られるよう工夫した。全計測点毎の総管長を等しくしたガスサンプリング系は常時吸引とし、タイムラグの影響の軽減化に配慮した。2台のガスセクターを5分間隔×4チャンネル(測定間隔20[分])に設定・操作し、ガスクロマトグラフ[P200 Micro GC: HP/標準ガス(1%FS)]を用いて経時的なガス濃度変動の分析を行なった。測定システムをFig. 3に示す。

3. 解析対象試験住宅のモデリング及び算定式

3-1 試験住宅のモデリング

試験住宅のモデル化に際し、Fig. 3に示すLVが室1、DKが室2、BSが室3、BNが室4、SCが室5に対応している。Fig. 3に示す試験住宅は5室モデル相当と言える。しかし、トレーサガスが4種に限られているので、実際に生じているであろう階段室のガス濃度むらや、階段室を介することでガス拡散移動に必要となるであろう時間遅れを無視して、Fig. 4-1に示す様な4種ガス・4室モデルへの簡略化を試みた。これは実体容積を持たない換気の連絡路として階段室を仮想したモデリングと言える。濃度測定に際して階段室の上下2カ所で4種ガス濃度を計測しているが、室間換気量の算定に階段室のガス濃度を用いていない。

Fig. 4-2は、2回に分けてガス放出を行い、階段室を含めた5室でトレーサガスを供給しているの、5種ガス・5室モデルのモデリングとなる。

3-2 算定式

室1を例に、4室モデルと5室モデルにおける換気量収支式とトレーサガス(i)の濃度常微分方程式を表示すると次の様になる。

4 室モデル：

室1の換気量収支式：

$$F_{01}+F_{21}+F_{31}+F_{41}-(F_{10}+F_{12}+F_{13}+F_{14})=0$$

室1のトレーサガス(i)濃度収支式：

$$C_{0i} \cdot F_{01} + C_{2i} \cdot F_{21} + C_{3i} \cdot F_{31} + C_{4i} \cdot F_{41} - C_{1i} \cdot (F_{10} + F_{12} + F_{13} + F_{14}) = V_1 \cdot dC_{1i} / dt - M_i$$

Table 1 Measurement conditions

Test	Ventilation method	Temperature difference	Air tightness [cm ² /m ²]	Door condition	Undercut of doors
1	Natural ventilation	30℃	1	close	160 φ
2	Natural ventilation	30℃	1	open	
3	Mechanical ventilation	30℃	1	close	160 φ
4	Mechanical ventilation	30℃	1	open	
5	Natural ventilation	30℃	5	close	160 φ
6	Natural ventilation	10℃	1	close	160 φ

Fig. 2 Location of Cylinders

Fig. 3 Measurement system

Fig. 4-1 4-zone model

Fig. 4-2 5-zone model

5 室モデル：

室1の換気量収支式：

$$F_{01} + F_{51} - (F_{10} + F_{15}) = 0$$

室1のトレーサーガス(i)の濃度収支式：

$$C_{0i} \cdot F_{01} + C_{5i} \cdot F_{51} - C_{1i} \cdot (F_{10} + F_{15}) = V_1 \cdot dC_{1i} / dt - M_i$$

ただし，

F_{kij} ：k室からj室への換気量[m³/h]， C_{ki} ：室kでのiガスの濃度[m³/m³]， V_1 ：室1の室容積[m³]， M_i ：iガスの発生量[m³/h]

20分毎のガス濃度測定データを用いて室間換気量を未知数とする室2～室5の換気量収支と各ガス収支の連立式を立てた。4室モデルで室数n=4とすると、一般にガス濃度と換気量の収支式の数はn(n+1)=20となるが、換気の経路によっては、20未満の式数で室間換気量の解を求めることができる。ガス濃度の測定結果をFig. 5～Fig. 10に示す。到達濃度の様子から、内外温度差が小さいTest 6は到達濃度が高くなるので換気量が少ないことや、機械換気を行ったTest 3, Test 4や気密性能が低いTest 5は到達濃度が低いので換気量の多いことが理解されるし、また、ある室のガス濃度が極端に低濃度かあるいはゼロになっている場合には、それは外気が多量に流入してそのガスの濃度が希釈されたか、あるいはその室にそのガスを放出した室の空気が全く流入していない状況にあることを意味している。濃度履歴から判断して、相互関係の希薄な室間換気成分を予め除去したモデリングを工夫

した。省略可能と思われる換気成分 F_{kj} を残したまま推定作業を進めることは、ルーティン的な作業にはなるが、換気量の算定精度の向上に直結する訳ではない。そこで実測では、Fig. 4-1に示す4室モデルの室間換気量20成分を8～12成分に、またFig. 4-2に示す5室モデルの室間換気量16成分を8～12成分とする収支式を工夫した。収支式が未知数を上回る場合には、それらを省略することなく並立させ、最小二乗法による整式を行った連立方程式にガウス消去法を用いて解を求め、換気量を算定した。

4. トレーサーガス法と差圧法による測定結果の比較

Fig. 7～12に経時的な換気量の算定結果を示す。定常の条件設定にも関わらず、温度差換気では、内外温度差が10[deg]のTest 6を除き、内外温度差を30[deg]にすると、ガス放出後、設定値(シリンダー差圧から推定した通過風量の測定値、Table 2の上段参照)に達するに必要な時間が、Test 5, Test 2, Test 1の順に増大している。また、機械換気のTest 3, 4は放出直後から設定値に近づいている。この理由として、①換気量の少ない[Test 6]は、冷外気が流入してもその流入層は薄くて、拡散され易い。実容積に対する影響も軽微で、多点サンプリングは一樣拡散に近いガス濃度を捉えている。②換気量の増加で[Test 2, 1]、流入の経路がより明確になって、主流域が形成されるようになると、放出直後の一樣拡散は難しい。多点サンプリングが高濃度域側にあると換気量を低めに(低濃度域側にあると換気量を高めに)算

Test 4

Test 5

Test 6

Fig.8-1 Gas concentration of CH₄ dosed in BN

Fig.9-1 Gas concentration of CH₄ dosed in BN

Fig.10-1 Gas concentration of CH₄ dosed in BN

Fig.8-2 Gas concentration of HFC dosed in LV

Fig.9-2 Gas concentration of HFC dosed in LV

Fig.10-2 Gas concentration of HFC dosed in LV

Fig.8-3 Gas concentration of SF₆ dosed in BS

Fig.9-3 Gas concentration of SF₆ dosed in BS

Fig.10-3 Gas concentration of SF₆ dosed in BS

Fig.8-4 Gas concentration of N₂O dosed in DK

Fig.9-4 Gas concentration of N₂O dosed in DK

Fig.10-4 Gas concentration of N₂O dosed in DK

Fig.8-5 Gas concentration of N₂O dosed in SC(5-zone model)

Fig.9-5 Gas concentration of SF₆ dosed in SC(5-zone model)

Fig.10-5 Gas concentration of SF₆ dosed in SC(5-zone model)

Fig. 7-1 Airflow rates in Test 1 of 4-zone model

Fig. 7-2 Air flow rates in Test 1 of 5-zone model

Fig. 8-1 Airflow rates in Test 2 of 4-zone model

Fig. 8-2 Air flow rates in Test 2 of 5-zone model

Fig. 9-1 Airflow rates in Test 3 of 4-zone model

Fig. 9-2 Air flow rates in Test 3 of 5-zone model

Fig. 10-1 Airflow rates in Test 4 of 4-zone model

Fig. 10-2 Air flow rates in Test 4 of 5-zone model

Fig. 11-1 Airflow rates in Test 5 of 4-zone model

Fig. 11-2 Air flow rates in Test 5 of 5-zone model

Fig. 12-1 Airflow rates in Test 6 of 4-zone model

Fig. 12-2 Airflow rates in Test 6 of 5-zone model

Fig. 13 Calculated results of airflow rates (m^3/h , the upper row : 4-zone model, the lower row : 5-zone model)

定する。時間の経過と共にガス濃度むらが緩和されて、設定値に達する。③相当開口面積を $5[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ に設定し、換気量が更に増大すると[Test 5]、穏やかに拡散する現象よりも空気塊が入れ替わる様な混合現象が優勢になり、設定値に達する時間は短縮されるが、一部に未拡散領域が残ったような場合には、換気量は低めに算定される。④機械換気になると[Test 3, 4]、混合現象が促進され、多点サンプリングは瞬時様に近いガス濃度を捉えている、等々が考えられる。

空間換気量の算定結果が設定値に近づいてくる3時間経過後の1時間平均値をFig. 13に示す。実測外気侵入量や排気量と設定値をTable 2に示す。その実測外気侵入量や排気量と設定値の相関をFig. 14に示す。設定値を基準にして精度を検証すると、多種トレーサーガス法による測定結果は、概ねシリンダー通過風量20～30%の範囲内で得られている。シリンダーの通過風量を基に、2

つのモデルを比較すると、両者とも換気量が小さめに算定された。多種トレーサーガス法による実測全体で見ると、5室モデルの R^2 値が高く、シリンダー風量との相関（傾き）で見ると、4室モデルの方が好結果となった。本実測のみで結論を出すのは早計であるが、多種トレーサーガス法が室数に応じたトレーサーガス数を必ずしも必要としないことや、実体容積のない仮定の換気連絡路を想定したモデリングも一つの有効な手段であることが確認された。

5. おわりに

換気量既知の実大試験住宅（シリンダーハウス）を用いた多種トレーサーガス法の検証結果から、次の知見を得た。

(1) 自然換気：4種、機械換気：2種、計6種の検証実験から、多種トレーサーガス法による4室モデルと5室モデルの換気量の算

定結果は、概ねシリンダー通過風量の20～30%の範囲内にあることが確認された。これは既報の2室モデルや3室モデルにおける検証結果と比べてもそれ程大きな開きはない^{5), 6)}。

(2) 機械換気は、放出直後から設定条件に極めて近い値を得ることが出来るが、温度差換気は換気量が増加すると、設定値に達するに必要とする時間が増大し、算定結果も低めに現れる。この原因として、円滑な拡散混合を阻む温度差換気特有の濃度むらが考えられ、多種トレーサガス法を用いて自然換気量を実測する際の、瞬時一様拡散とその必要条件である室平均濃度の測定に向けた工夫は、引き続き今後の要検討課題である。

(3) 多数室の室間換気量の測定に際し、室総数未満のトレーサガス数であっても、実体容積なしの仮定の換気連絡路を想定する等のモデリングを工夫することによって、多種トレーサガス法を用いた限定ターゲットの室間換気量の測定は可能である。

本論文は5th CANADA/JAPAN Housing Workshop 報告¹⁰⁾を基に新しい知見を加えて整理したものである。

謝辞：本共同研究は建築研究所第5研究部・坊垣和明博士の助言から出発している。測定に際し(財)ペーターリビング筑波建築試験センターの協力、換気量既知空間による多種トレーサガス法の検証に際しカナダ国立研究所C.Y. Shaw博士の示唆、及び平成11年度文部省科学研究補助金B2(10450208)の研究援助があった。記して感謝する。

参考・引用文献：

- 1) 荒谷登・斎藤純司：2種ガス(CO₂, C₃H₈)連続発生による多数室建物の換気量測定法について、日本建築学会大会学術講演梗概集・環境, pp. 307-308, 昭和47年10月
- 2) H. Honma: Ventilation of Dwellings and Its Disturbances(1975), Fabio Grafiska, Stockholm
- 3) S.J. I'Anson, C. Irwin, A.T. Howarth: Airflow Measurement Using Three Tracer Gases, Building and Environment Vol.17, No.4, pp.245-252, 1982
- 4) M. Enai, C.Y. Shaw, J.T. Reardon, R.J. Magee: Multiple Tracer Gas Techniques for Measuring Interzonal Airflows for Three Interconnected Spaces, ASHRAE Trans. AT-90-5-2(3369), 1990.1
- 5) M. Enai, N. Aratani, C.Y. Shaw, J.T. Reardon: Differential and Integral Method for Computing Interzonal Airflows Using Multiple Tracer Gases, Proceedings of ISRACVE, ASHRAE (90363) pp.357-362, 1993.7
- 6) 絵内正道・荒谷登・C.Y. Shaw: 多種トレーサガス法に基づく多数室換気量の算定 part-1, 空気調和・衛生工学会論文集 No.51, pp.15-17, 1993.2
- 7) 奥山博康・澤地孝男・瀬戸裕直・大西由哲：トレーサガスを用いた換気性状把握手法の検証と改良 その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集・環境, pp. 641-642, 1997.9
- 8) 絵内正道・C.Y. Shaw, J.T. Reardon・荒谷登・梶井浩史・福島史幸：多種トレーサガス法に基づく多数室換気量の算定 part-2, 空気調和・衛生工学会論文集 No.72, pp.117-127, 1999.1
- 9) 山田裕巳・林基哉：多室への新鮮空気配分を考慮したパッシブ換気方式の検討(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)・D2, pp. 615-616, 1997.9
- 10) 絵内正道・島田潔・福島史幸・澤地孝男・瀬戸裕直：換気量既知の試験住宅を用いた多種ガス法の検定, 5th CANADA/JAPAN Housing Workshop, pp.400-407, 1999.8

Table 2 Results obtained by pressure difference and those obtained by the tracer gas technique (m³/h)

Test	Method	LV	DK	BS	BN	Exhaust airflow rates
1	Pressure difference	-15.0	-14.7	14.4	14.7	
	Tracer gas technique (4-zone)	-12.3	-12.2	11.4	13.1	
	(5-zone)	-13.1	-12.0	12.0	13.0	
2	Pressure difference	-14.8	-14.6	14.6	14.7	
	Tracer gas technique (4-zone)	-18.1	-13.5	26.3	5.2	
	(5-zone)	-15.1	-13.2	4.3	24.0	
3	Pressure difference	-25.7	-26.5	-14.7	-14.5	81.4
	Tracer gas technique (4-zone)	-20.3	-39.3	-12.2	-14.4	86.3
	(5-zone)	-13.2	-34.3	-12.3	-11.8	71.5
4	Pressure difference	-25.7	-26.5	-14.6	-14.4	81.2
	Tracer gas technique (4-zone)	-35.2	-29.5	-12.7	-12.3	89.6
	(5-zone)	-19.0	-28.7	-9.9	-10.4	67.9
5	Pressure difference	-64.8	-64.8	63.2	63.6	
	Tracer gas technique (4-zone)	-41.4	-54.1	43.5	52.0	
	(5-zone)	-38.2	-53.1	37.7	52.5	
6	Pressure difference	-9.2	-8.8	8.0	8.5	
	Tracer gas technique (4-zone)	-7.1	-7.0	6.7	7.3	
	(5-zone)	-6.6	-7.1	7.0	6.6

Fig. 14 Correlation between airflow rates measured by differential pressure and those obtained by tracer gas techniques

- 11) 澤地孝男・坊垣和明・大澤元毅・瀬戸裕直・大西築樹・谷口佳記：住宅の換気システムに関する実験的研究 その2 実験施設(シリンダーハウス)の特性、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(熊本), II, pp. 649-652, 1994

(1999年11月26日原稿受理, 2000年6月22日採用決定)