

単一トレーサーガス測定による複数ゾーンの換気量推定法とその信頼性評価に関する研究

環境システムコース 環境プロセス工学分野 26640 奥泉裕美子

1. 緒言

近年、省エネルギーを目的とした建物の高气密化や、新建材から放散される化学物質による室内空気汚染が問題となっている。換気は、室内汚染対策の有効な手段の一つである⁽¹⁾。2003年7月に施行された改正建築基準法では、シックハウス対策として規定以上の換気量を保持できる換気設備の取り付けが義務化されたこともあり、換気に対する関心が高まっている。

換気の種類は、1時間あたりの外気導入(出)量を示す換気量(m^3/hr)や、換気量を対象空間の容積で除した換気回数(hr^{-1})で表される。現在、広く用いられている換気量の測定方法は、濃度減衰法および一定濃度法であるが、この方法は大がかりな装置を必要とし、測定コストが高くなるという問題点がある。そのため、低コストで簡便に換気量を測定できる方法の開発が望まれている。比較的簡便な方法としてPFT(Perfluorocarbon Tracer Technique)法がある。PFT法は、不活性ガスであるperfluorocarbonをトレーサーガスとして対象空間内に放出させ、測定空間内のトレーサー濃度を測定する方法である。一般に互いに濃度完全混合でない複数のゾーンが測定対象となるとき、PFT法によって換気量を算出するためには、濃度の時間変化データの取得あるいは複数のトレーサーを使用する必要がある。しかしこれらの方法は操作が煩雑で、PFT法の利点である簡便さを損なうことになる。測定が容易であるのは、トレーサーガスの放散を開始から十分時間がたった後の定常状態におけるトレーサー濃度であるが、複数ゾーンが存在するときには、定常濃度から一意的に換気量を算出することは数学的に不可能である。そのため、定常濃度から換気量を推算する方法が必要となる。本研究では定常濃度測定の結果から換気量を推定する方法として、容積加重平均濃度による換気量推定法を取り上げ、推定法の妥当性を評価することを目的とした。そのため、実住宅でのPFT法測定を行い、一定濃度法による換気量の測定結果と、定常濃度PFT法の結果から推定した換気量の比較を行うと共に、より広い条件での仮想空間での数値シミュレーションを行い推定換気量の誤差評価を行った。さらに、換気に関する数学的モデルを用いて、定常濃度をパラメータとする推定換気量の誤差評価手法を開発した。以上により定常濃度からの換気量推算法の信頼性について評価することを試みた。

2. PFT法による換気量測定手法とその検討

PFT法では測定対象をいくつかのゾーンに分け、ゾーン内空気は完全混合にあると仮定する。各ゾーンにPFTの放出器(ドーザー)を設置し、一定速度でPFTを放出させる。室内空気のサンプリングを、室内トレーサーガス濃度が定常であるとしても問題の生じないほど十分な時間行い、定常濃度を決定する。本研究ではドーザーとしてFig. 1に示すようなバイアル瓶にディフュージョンキャップを装着したものをを用いた。トレーサーガスとして、perfluoromethylcyclohexaneを用い、重量変化測定により放出速度が一定であることを確認した。サンプラーとしてステンレスチューブ(ATD-tube)に吸着剤Carbpack Bを充填したものをを用いた。トレーサーガスを含む室内空気

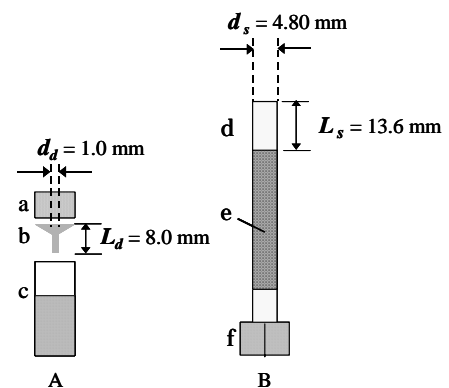


Fig. 1 (A)ドーザーおよび(B)サンプラー a キャップ, b ディフュージョンキャップ, c バイアル, d ATD-tube, e 吸着剤, f SwageLok

は、サンプラー内に分子拡散によって取り込まれる。サンプリング後、加熱脱着により吸着されたトレーサーガスを脱着し、GC-MS 法により分離・定量を行った。サンプラー内にトレーサーガスが取り込まれる速度(サンプリングレート)は、アクティブサンプリングとパッシブサンプリングを同時に行い、両者の捕集量を比較することで算出し、それを用いて空気中のトレーサーガス濃度を決定した。測定は実際の住宅を対象として一定濃度法による換気量測定もあわせて行った。一定濃度法は、全てのゾーンでトレーサーガス濃度が一定となるように放出速度をコントロールする手法であり、正確な換気量を求めることができる。

3. 実測値に基づく PFT 法と一定濃度法との比較

ゾーンが複数個存在する住宅 3 軒における換気量測定の結果を Fig. 3 に示す。PFT 法による換気回数は、容積加重平均濃度で全放出速度 E を除する方法 (F_c) の結果である。容積加重平均濃度 \bar{C} は定常状態で各ゾーンに存在するトレーサーの全量 $\sum C_i V_i$ を全容積 $\sum V_i$ で除した値であり、 F_c は全放出量 $\sum E_i$ と容積加重平均濃度の比で与えられる。

$$F_c = \frac{\sum E_i}{\bar{C}} \quad (1), \quad \bar{C} = \frac{\sum C_i V_i}{\sum V_i} \quad (2)$$

ここで、 C_i 、 V_i 、 E_i はゾーン i の濃度、容積、PFT 放出速度である。したがって、 F_c は全ゾーンを容積加重平均濃度 \bar{C} 、放出量 $\sum E_i$ をもつ 1 ゾーンで置き換えた場合の外気との換気量という物理的意味を持つ。一定濃度法によるより正確な換気回数と F_c は比較的よい一致を示した。このことは、一般の家屋において、容積加重平均濃度による 1 ゾーン近似が成り立つことを示唆しているものと考えられる。

4. 乱数発生シミュレーションによる PFT 法の評価

一定濃度法は測定が大がかりであり、操作が煩雑なため数多くの対象について換気量測定を行い、PFT 法の結果と比較することは現実的ではない。そこで、あらかじめ収支式を満たすような換気量、放出速度、空間容積、PFT 濃度の組をランダムに発生させ、それぞれについて正確な換気速度 F_g と容積加重平均濃度による推定換気速度 F_c を比較することにした。簡単のため、ゾーンは 2 つとし、また現実の住宅を想定して V_i は 0-70m³、 E_i は 0-15mg/h、 F_{ij} は 0-350m³/h の範囲を設けた。想定した 2 ゾーンモデルを Fig. 3 に示す。各ゾーン内は完全混合であるとし、また外気中のトレーサー濃度は 0 であると仮定すると、トレーサーガスおよび空気の収支は以下の式で与えられる。

$$0 = E_1 + F_{21}C_2 - (F_{10} + F_{12})C_1 \quad (3)$$

(ゾーン1でのトレーサーの収支)

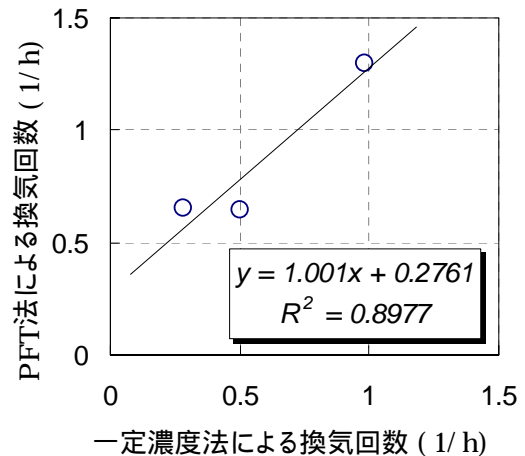


Fig. 2 一般住宅で同時に行った一定濃度法と PFT 法による換気回数の相関

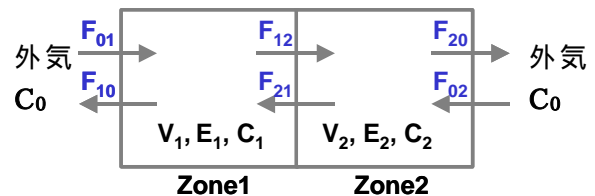


Fig. 3 2 ゾーンモデル

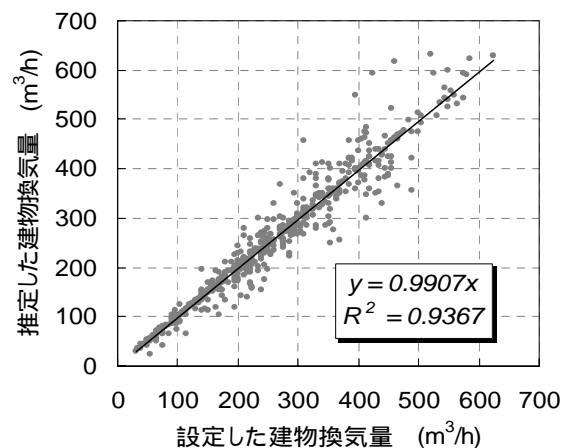


Fig. 4 シミュレーションで作成した住宅の設定換気量と推定換気量の相関 (n=500)

$$0 = E_2 + F_{12}C_1 - (F_{20} + F_{21})C_2 \quad (4) \quad (\text{ゾーン 2 でのトレーサーの収支})$$

$$F_{01} + F_{21} = F_{10} + F_{12} \quad (5) \quad (\text{ゾーン 1 での空気の収支})$$

$$F_{02} + F_{12} = F_{20} + F_{21} \quad (6) \quad (\text{ゾーン 2 での空気の収支})$$

ただし、 F_{01} , F_{02} , F_{10} , F_{20} , F_{12} , F_{21} は図中に示したゾーン間および外気との換気量である。このとき、外気との換気量の和 F_g は、 $F_{01} + F_{02} (= F_{10} + F_{20})$ によって与えられる。乱数によって発生させた 500 ケースに対するシミュレーションの結果を Fig. 4 に示した。両者の結果は特に低換気量領域で比較的良好に一致した。高換気量範囲でも誤差は高々 50 % 程度であり、 F_g による換気量の推定法が広い範囲の換気量で適用可能であることが示された。

5. 推定換気量の誤差評価

実測値の場合も乱数発生シミュレーションの場合も容積加重平均濃度による推定換気量 F_c と実際の換気量は比較的良好に一致したが、 F_c の誤差を決定する因子を明らかにするため、2 ゾーンモデルに基づく誤差解析を行った。

式(3)~(6)中の 6 個の換気量 F_{01} , F_{02} , F_{10} , F_{20} , F_{12} , F_{21} は未知数であり、それに対して式は 4 個しか与えられていないため、数学的に一意な換気量の値を決定することは不可能である。そこで、実際の換気量 F_g と推定換気量 F_c の相対誤差を表すパラメータ y を導入する。

$$y = \frac{F_c - F_g}{F_g} \quad (7)$$

収支式と定義式を用いて、 y を次のような 3 通りの換気速度の組で表すことができることが示される。

$$y = \frac{(V_1 + V_2) \cdot (C_1 F_{10} + C_2 F_{20})}{(C_1 V_1 + C_2 V_2) \cdot (F_{10} + F_{20})} - 1 \quad (F_{10}, F_{20}) \quad (8)$$

$$y = \frac{(E_1 + E_2) \cdot C_1 \cdot (V_1 + V_2)}{\{E_1 + C_1 F_{02} - (C_1 - C_2) F_{21}\} \cdot (C_1 V_1 + C_2 V_2)} - 1 \quad (F_{02}, F_{21}) \quad (9)$$

$$y = \frac{(E_1 + E_2) \cdot C_2 \cdot (V_1 + V_2)}{\{E_2 + C_2 F_{01} + (C_1 - C_2) F_{12}\} \cdot (C_1 V_1 + C_2 V_2)} - 1 \quad (F_{01}, F_{12}) \quad (10)$$

以上の式を用いて、それぞれの換気量が負でないことの条件を課すことで、 y のとりうる範囲として以下の必要条件が導くことができる。

(1) $0 < x$ の時

$$f_1(x) < y < f_2(x) \quad \text{かつ} \quad y < f_3(x) \quad (11)$$

(2) $x < 0$ の時

$$f_1(x) > y > f_2(x) \quad \text{かつ} \quad y < f_4(x) \quad (12)$$

ただし、 $y = f_i(x)$ ($i = 1 \sim 4$) は(8)~(10)式でそれぞれの換気量を 0 とおくことで得られる次の巻数である。

$$f_1(x) = -\frac{2V_1 \cdot x}{(V_1 + V_2) + (V_1 - V_2) \cdot x} \quad (F_{20} = 0) \quad (13)$$

$$f_2(x) = \frac{2V_2 \cdot x}{(V_1 + V_2) + (V_1 - V_2) \cdot x} \quad (F_{20} = 0) \quad (14)$$

$$f_3(x) = \frac{-\{2E_2V_1 + E_1(V_1 + V_2)\} \cdot x + E_1(V_1 + V_2)}{E_2(V_1 - V_2) \cdot x + E_2(V_1 + V_2)} \quad (F_{02} = F_{21} = 0) \quad (15)$$

$$f_4(x) = \frac{\{2E_1V_2 + E_2(V_1 + V_2)\} \cdot x + E_2(V_1 + V_2)}{E_1(V_1 - V_2) \cdot x + E_1(V_1 + V_2)}$$

$$(F_{01} = F_{12} = 0) \quad (16)$$

ここで、 x は以下の式で与えられる無次元濃度である。

$$x = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \quad (17)$$

無次元濃度 x は定常濃度測定の結果から算出することができるので、あらかじめ与えられた x に対して y の変化しうる範囲を評価できれば、測定によって得られた推定換気量 F_C が実際の換気量 F_g に対してどの程度の誤差を含むかの評価が可能となる。

容積 (V_1, V_2) = (10, 30)、放出速度 (E_1, E_2) = (1, 2) の条件の下で、収支式を満たす乱数として発生させた換気量、濃度の各組について、 (x, y) をプロットした図を関数 $y = f_i(x)$ ($i = 1 \sim 4$) と共に Fig. 5 に示した。

すべての点 (x, y) は上で求めた必要条件を満たしていることが分かる。この図により、定常濃度測定結果によって決まる無次元濃度 x から、推定換気量 F_C の最大誤差の見積もりが可能となる。例えば、実測を行った結果、 $x = 0.4$ (図中の矢印で示した箇所) であるとき、 y の値域は $-0.250 \leq y \leq 0.125$ となる。すなわち、推定換気量 F_C は実際の換気量 F_g の 0.75 倍から 1.125 倍の範囲にあることが分かる。さらに、 $x = 0.8$ のような F_C の範囲に実際の換気量 F_g を含まないような場合でも、実際の換気量との誤差を評価することが可能である。

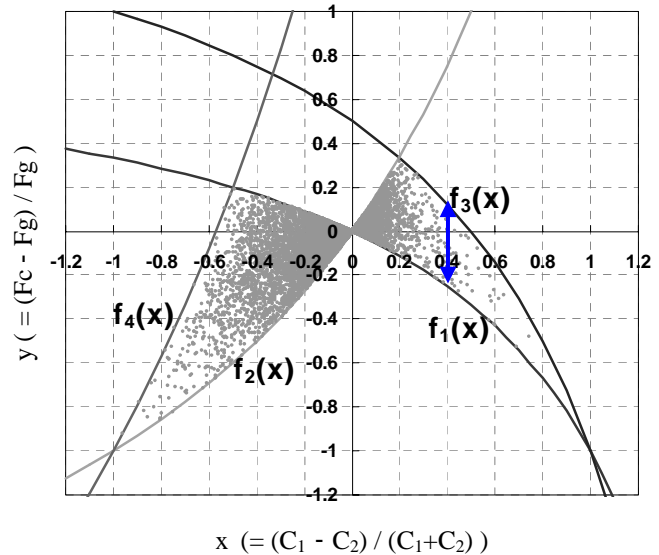


Fig. 5. (V_1, V_2) = (10, 30) (E_1, E_2) = (1, 2) の場合の (x, y) の領域

5. 結言

- ・ PFT 法による換気量測定のためのドーザー、サンプラーの基礎性能の検討を行った。
- ・ 容積加重平均濃度による換気量の推算値 F_C は、より正確な測定法である一定濃度法の結果と比較的よい一致を示した。また、2 ゾーンモデルを用いて収支式を満たす各パラメータの組を乱数で発生させた場合の実際の換気量 F_g と推定換気量 F_C もよい一致を示した。
- ・ 2 ゾーンモデルを用いて、実際の換気量 F_g と推定換気量 F_C の誤差範囲が、ゾーン間の無次元濃度差 x の関数として与えられることを示した。これにより、与えられたトレーサーガスの放出速度と測定空間容積に対して、定常濃度の容積加重平均から求めた推定換気量の誤差評価が可能であることが示された。

参考文献

1. 吉野博, シックハウス問題と居住環境-現状と対策-, 建築雑誌, Vol.117 No.1491 (2002) pp.8-11
2. R.Dietz and E.Cote, Air Infiltration Measurements in A Home Using A Convenient Perfluorocarbon Tracer Technique, Environment International 8 (1982) pp. 419-433
3. 吉野博 他, 居住状態の住戸 24 戸における 3 種類の方法による換気量測定, 日本建築学会技術報告集 第 20 号