

漏入空気の影響を考慮した換気効率指標の算出方法

住宅の換気システムに関する研究 その2

MEASUREMENT OF AIR CHANGE EFFECTIVENESS USING METHOD
OF INFILTRATION VALUE

Study on ventilation system of house Part 2

赤林伸一*, 坂口 淳**

Shin-ichi AKABAYASHI and Jun SAKAGUCHI

This paper described the field measurement results of the local mean age of air which was defined the time of air reaching to the measuring points, and the local air change effectiveness in the wooden detached house. The evaluation of infiltration is indispensable because there are many variation of the infiltration (natural ventilation) in comparison with the office building.

However, it is difficult to evaluate the amount of infiltration quantitatively as for the infiltration because it changes by the difference in temperature outside the inside and the wind speed and direction.

When ventilation is evaluated by the measurement of local mean age of air, they must evaluate local mean age of air of the amount and change of infiltration. The air change effectiveness changed in the amount of infiltration and age of air of the infiltration were put in the consideration was examined which was by this paper.

As a result, how to calculate the amount of infiltration of every measurement point by using response factor method with the outside wind speed and a difference in indoor and outside temperature was tried, and have a good result which get age of infiltration air.

Keywords: Air Change Effectiveness, Infiltration, Air Change Index, Age of Air, Age of Infiltration Air

換気効率、漏入外気、空気交換効率、空気齢、漏入外気の空気齢

1. はじめに

前報(その1)では集中換気システムを設置した木造独立住宅を対象に換気効率に関する実測調査を行い、室内での空気循環の有無や漏入外気が換気効率指標に与える影響について報告した。住宅の換気はオフィスビルなどに比較して、漏気(自然換気)の割合が多いためこれを評価することが必要不可欠である。しかしながら、漏気量は室内外の温度差や外部風向風速により変動するため、漏気量を定量的に評価することは困難である。更に局所平均空気齢の測定によって換気性能を評価する場合には、漏入空気量と漏入空気の局所平均空気齢を算出する必要がある。

換気効率指標の測定方法については、ASHRAE³⁾では「供給空気のトレーサーガス濃度と最終的な排気空気の到達濃度との差は10%以内であること」と漏入空気量に制約がある。しかし、実際の住宅における局所平均空気齢の測定において、漏気の影響が少ない条件で測定することは困難であり、漏気が局所平均空気齢に基づく換気効率指標に与える影響を考慮する必要がある。

隙間風量(漏気量)については、種々の研究がされており、室内外温度差、外部風速と換気量の実験によって明らかにし、換気量を求める方法が種々提案されている^{4)~7)}。これらの方法では漏入空気は室内において瞬時一様拡散することが前提となっているた

め、局所平均空気齢を求める場合、その理論と矛盾を生じる。漏入空気の空気齢については、小林ら⁸⁾によって2種類のトレーサーガスを用い、ステップアップ法とステップダウン法で同時に行う方法が提案されている。この方法は漏入空気量を測定期間中では一定量と仮定している為、内外温度差や外部風速が変化し漏入空気量が変動する場合には検討すべき課題がある。

本報(その2)では、漏入空気量の変動と漏入空気の空気齢を考慮に入れた解析を行う方法について検討する。すなわち、漏入空気の空気齢を外部風速と室内外温度差の応答係数で説明し、測定点ごとの漏入空気量を算出する方法を試みた結果について報告する⁹⁾。

2. 対象住宅の概要

(1)対象住宅の平面

図1に対象住宅の平面図を示す。新潟県新潟市に建設された木造軸組工法の2階建住宅である。延床面積は127m²、容積は小屋裏および1階床下を含めて497m³である。隙間の有効開口面積は、約3cm²/m²(表1)である。

(2)換気設備の概要

図2に換気設備の概要を示す。全熱交換型換気扇で外気を居間の

本論文の概要は日本建築学会大会学術講演会(平成6年9月)、日本建築学会北陸支部大会(平成7年8月)において発表した(文献1,2)

* 新潟大学大学院自然科学研究科 助教授・工博

** 県立新潟女子短期大学生活科学科 講師・博士(工学)

Assoc. Prof., Graduate School of Science and Technology, Niigata Univ., Dr. Eng. Lecturer, Dept. of Human Life and Environmental Science, Dr. Eng.

表1 対象住宅の概要

延床面積	: 127m ²	容積	: 497m ³
建設時期	: 1993年7月	建築場所	: 新潟県新津市
気密性能	: 隙間の有効開口面積 加圧法3.1cm ² /m ² 減圧法3.3cm ² /m ²		
熱損失係数	: 1.28kcal/hm ² °C (設計図書より算出)		
暖冷房設備	: 1階床下にヒートポンプの室内機を設置 最大暖房能力9.5kw 最大冷房能力7.8kw 風量1400m ³ /h		
換気設備	: 集中式全熱交換換気システム。取り入れ外気量は66m ³ /h		

表2 実験条件と測定期間

条件	実験期間	外気温	室温	外部風速
空調機運転	93年12月2日~12月11日	1~15°C	21~32°C	0~4m/s
空調機停止	93年12月13日~12月17日	1~9°C	8~26°C	0~10m/s

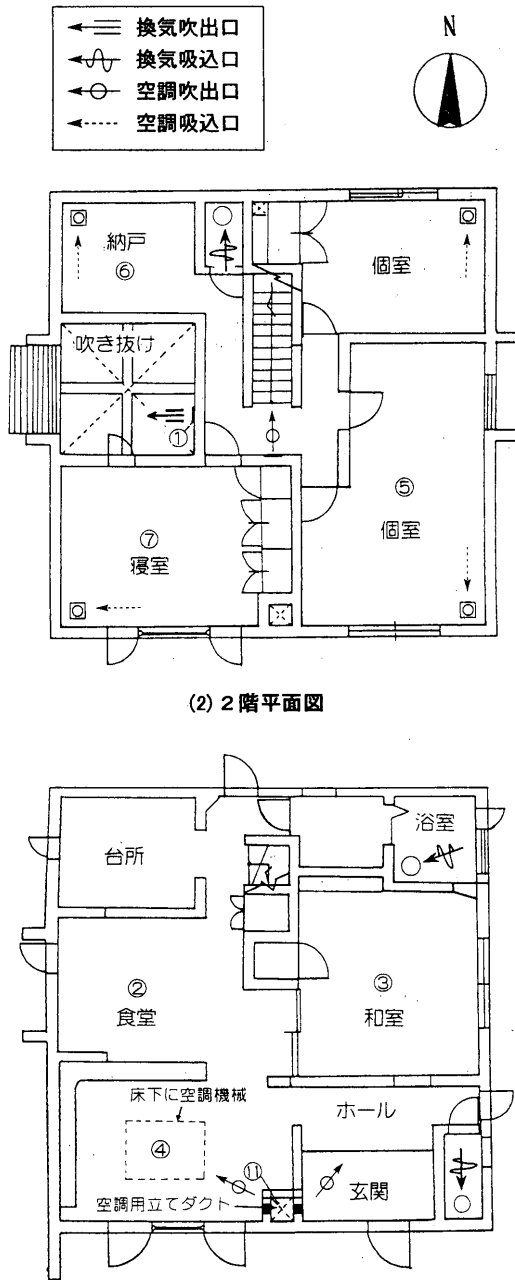


図1 対象住宅の平面と測定点

吹き抜け部分に供給し、便所と浴室から熱交換換気扇を経由して排気する。この住宅には各室の天井に空調用の吸込口が設置されており1階天井裏、小屋裏を経由して床下に設置された空調機に戻り、居間、2階廊下から吹き出す全室冷暖房設備が設置されている。

(3) 実験条件

実験条件と測定期間を表2に示す。対象住宅は全室冷暖房設備が設置されているので、空調機を運転し住宅全体の空気を循環させた場合と空調機を停止させた場合の2ケースについて実験を行う。

3. 漏入空気の影響を考慮した局所平均空気齢の算出方法

室内の漏入空気量は、屋外の外部風速と内外温度差によって変化する。漏入空気が常に一定量ある場合にはステップアップ法によって機械換気による局所平均空気齢 τ_p 、局所空気交換効率 ϵ_p を測定することが可能である。しかし、住宅では換気回数が少なく、局所平均空気齢の測定は長時間を必要とするため、漏入空気量が測定期間中変動することが考えられる。換気性状を詳細に把握するためには、漏入空気の変動を考慮にいたった解析を行う必要がある。また、建物の隙間は、建物の外壁全体に均一に分布していないため、室内

- (記号) Q : 熱交換換気扇の風量[m³/s] l_e : 熱交換換気扇内部のリーク量[m³/s]
 Q_s : 取り入れ外気量[m³/s] ($Q_s=Q-l_e$) G : トレーサーガス供給量[m³/s]
 V : 住宅容積[m³] $w(t)$: 外部風速[m/s] $\theta(t)$: 内外温度差[°C]
 $C_p(t)$: 各測定点の濃度[-] $C_s(t)$: 熱交換換気扇の給気口の濃度[-]
 $\kappa(t)$: 漏入空気量[m³/s] $\Phi_w(t)$: 外部風速による漏入空気の応答係数[-]
 $\Phi_r(t)$: 内外温度差による漏入空気の応答係数[-] d (方向): 風向(1=N, 2=E, 3=S, 4=W)
 $C_p(t)$: 漏入空気の補正を行った各測定点の濃度[-]
 τ_p : 局所平均空気齢[s] τ_n : 名目換気時間[s] (27180sec) ϵ_p : 局所空気交換効率[-]

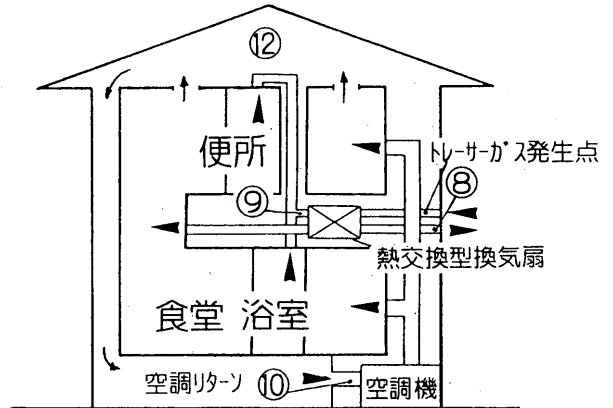


図2 対象住宅の換気・空調システム

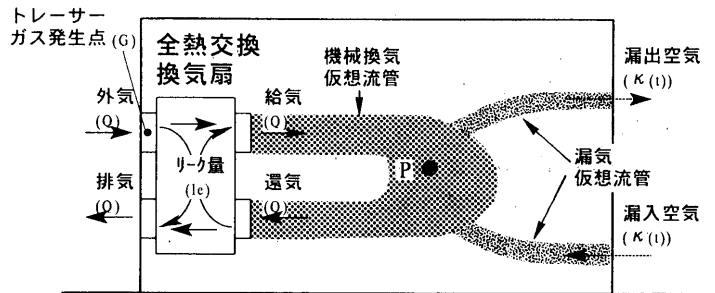


図3 解析空間の概要

の任意の点に到達する漏入空気量は風向によって変化することが想定出来る。本報では外部風をN、E、S、W風向の4要素に分解し、外部風の4要素と室内外の温度差を外界入力条件として漏入空気量の予測式の作成方法について検討する。漏入空気は機械換気による外気と同様に室内の任意の点に到達するまでに時間がかかる。そのため空気齢による換気の評価を行う際には、漏入空気の室内における分布を考慮にいれ、室内の任意の点に到達する漏入空気量の予測式に空気齢を導入する必要がある。そこで従来熱の分野などで用いられる応答係数法の概念を利用し、室内のある点ごとに漏入空気の局所平均空気齢を応答係数で説明し、外部風速と室内外温度差から評価する方法を試みた。

室内の任意の点に到達する外気は、機械換気による外気と漏入空気に分けることが出来る。それぞれを仮想流管によって図3のようにモデル化出来る。定常状態に置いて給気口から機械換気によって室内に供給されたトレーサーガスはすべて室内の任意の点Pに到達すると仮定すると、点Pのトレーサーガス濃度は、(1)式となる。

$$C_p(t) = \frac{Q \int_0^t C_s(t-u) du}{Q + \int_0^t K(t-u) du} \quad \dots (1)$$

(1)式の右辺分母は、機械換気による外気量と漏入空気の総外気量、分子はトレーサーガスの量である。ここで熱交換換気扇の外気取入口において、トレーサーガスをG発生させた場合、熱交換換気扇内部のリークにより還気空気が室内に再供給するため、定常状態での給気口のトレーサーガスの量は式(2)の様に無限級数和で表せる。

$$\begin{aligned} \int_0^t C_s(t-u) du &= G \frac{Q-le}{Q} + \left(G \frac{Q-le}{Q} \right) \left(\frac{le}{Q} \right) + \dots + \left(G \frac{Q-le}{Q} \right) \left(\frac{le}{Q} \right)^{\infty} \\ &= G \left\{ \frac{Q-le}{Q} \right\} \cdot \sum_{r=1}^{\infty} \left(\frac{le}{Q} \right)^{r-1} = G \left\{ \frac{Q-le}{Q} \right\} \left\{ \frac{Q}{Q-le} \right\} = G \end{aligned} \quad \dots (2)$$

(2)式右辺第一項は給気口から室内に供給されたトレーサーガス量、二項以降は熱交換換気扇内部のリークにより再び室内に供給されるトレーサーガスの量である。(1)式に(2)式を代入すると(3)式となる。

$$\left\{ Q + \int_0^t K(t-u) du \right\} \cdot C_p(t) = Q \cdot G \quad \dots (3)$$

(3)式より、漏入外気量は定常時の濃度応答より(4)式となる。

$$\int_0^t K(t-u) du = \frac{Q \cdot G}{C_p(t)} - Q \quad \dots (4)$$

ここで、外部風速による漏入外気の応答係数 $\Phi_w(t)$ 、室内外温度差による漏入外気の応答係数を $\Phi_T(t)$ として(5)式、(6)式と仮定する^{注2)}。

$$\Phi_w(t) = A_w + B_w \cdot e^{-\lambda t} \quad \dots (5)$$

$$\Phi_T(t) = A_T + B_T \cdot e^{-\lambda t} \quad \dots (6)$$

漏入空気量は外部風速に比例し、室内外温度差の平方根に比例するとすると^{注3)}、(7)式となる。右辺第一項は外部風速(4風向)による漏入空気量、第二項は内外温度差による漏入空気量を表す。

$$\begin{aligned} \int_0^t K(t-u) du &= \\ & \left\{ \sum_{r=1}^4 \alpha_d \int_0^t w_d(t-u) \cdot \Phi_{w_d}(t) du \right\} + \beta \int_0^t \sqrt{\theta(t-u)} \cdot \Phi_T(t) du \end{aligned} \quad \dots (7)$$

従って定常時において(4)式と(7)式が成り立つように(7)式の α_d 、 β を求めれば、外部風速と内外温度差から漏入空気量を算出することが可能である。しかしながら外部風速と室内外温度差の応答係数には未定係数 λ が含まれているため単純に α_d 、 β を導くことは出来ない。そのため適当な λ を求める必要がある。 λ を山登り法により変化させて、(4)式によって算出される漏入空気量と(7)式で算出される漏入空気量の差が最小となる値を求め、 λ の値とする。定常状態で算出した漏入外気量と外部風速、内外温度差の関係より(8)式に示すように濃度履歴を補正し、漏入外気の影響を取り除く。

$$C_p'(t) = C_p(t) \cdot \frac{Q + \int_0^t K(t-u) du}{Q} \quad \dots (8)$$

(8)式で得られた濃度履歴から漏入空気の影響を取り除いた換気効率指標を算出することが出来る。局所平均空気齢 τ_P 、空気交換効率 ε_P の算出方法は表3に示す。

4. 漏入空気の影響を取り除いた換気効率指標算出結果の例

4.1 濃度履歴

測定によって得られたトレーサーガス濃度の履歴を空調機運転時は図4、空調機停止時は図6に示す。また漏入空気の影響を取り除いた濃度履歴を空調機運転時は図5、空調機停止時は図7に示す。漏入空気による影響を取り除いた定常時の濃度は、どの測定点もほぼ一定となる。これは理論上、漏入空気の無い場合での室内濃度分布がどの場所においても同じであることと合致し、漏入空気の影響を取り除いたことを示している。一方、空調機停止時の床下と小屋

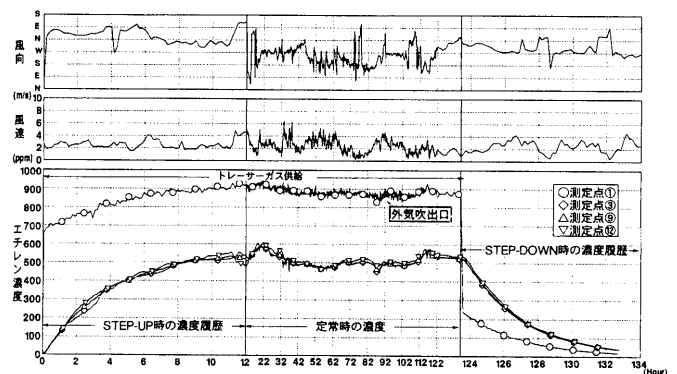


図4 トレーサーガス濃度の測定結果 (空調機運転時)

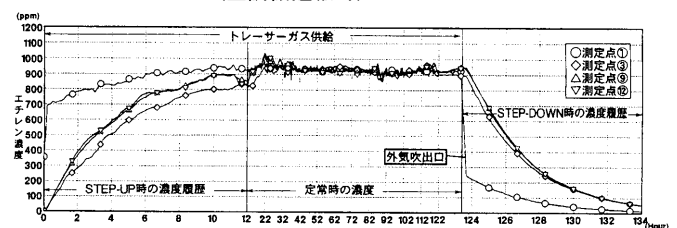


図5 漏入空気補正後の濃度履歴 (空調機運転時)

裏は、機械換気による外気が供給されにくいと、定常時の濃度が変動し、この場所において漏入空気の影響をすべて取り除くことは困難である。

4.2 局所平均空気齢 τ_p

漏入空気の影響を取り除いた濃度履歴から算出した τ_p を図8に示す。 τ_p の値は、ステップアップ法とステップダウン法ではほぼ同じ値となる。外気吹出口に近い測定点ほど、 τ_p が短く、 τ_p で室内の換気性状が評価できる。また、ステップアップ法とステップダウン法はほぼ同様な値を示し、この点においても理論上と合致する。吹出口を除いた τ_p は約100分～約280分の範囲に入る。このため、測定点ごとの漏入空気の影響を取り除くためには、局所平均空気齢が測定点に外気が到達する度数の中心値である場合には2倍の漏入空気量の変化(外部風速や内外温度差)を考慮しなくてはならない。本研究で提案する方法は、このような長時間にわたる漏入空気の変化を捉え、漏入空気の影響を取り除くことが可能である。

4.3 局所空気交換効率 ε_p

漏入空気の影響を取り除いた濃度履歴から算出した ε_p を図9に示す。 τ_p と同様に、 ε_p もステップアップ法とステップダウン法はほぼ同様な値となり、外気吹出口に近い測定点ほど ε_p が大きい。

4.4 漏入空気補正前後の空気齢の比較

補正前の τ_p と補正後の τ_p の関係を図10に示す。漏入空気の影響が大きい空調機停止時のステップアップ法による測定の場合において、補正後の τ_p は補正前の τ_p よりも約100分程度短い傾向がみられる。ステップアップ法では機械換気による外気だけにトレーサガスが含まれているため、濃度の変化は漏入空気の影響により漏入空気が無い場合よりも緩やかな変化となり、 τ_p が長い値で算出される。そのため、この点は理論上と合致した結果となっている。

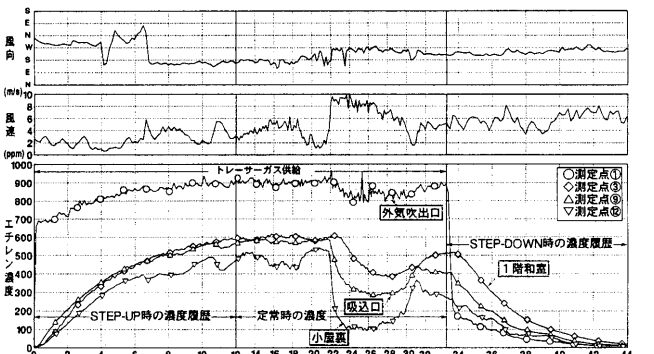


図6 トレーサガス濃度の測定結果 (空調機停止時)

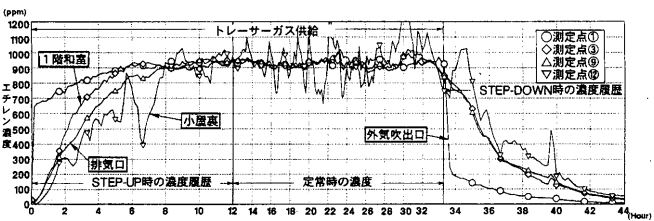


図7 漏入空気補正後の濃度履歴 (空調機停止時)

4.5 漏入空気の補正前後の空気交換効率の比較

補正前の ε_p と補正後の ε_p の関係を図11に示す。 τ_p の比較の場合と同様に空調機停止時のステップアップ法の測定の場合において、補正前後の ε_p の値が異なる。

表3 換気効率指標の算出方法

〈局所平均空気齢の算出方法〉

$$\tau_p = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \frac{C_p(t)}{C_p(\infty)} \right\} dt \quad \dots \text{ステップアップ法}$$

$$\tau_p = \int_0^{\infty} \left\{ \frac{C_p(t)}{C_p(\infty)} \right\} dt \quad \dots \text{ステップダウン法}$$

〈局所空気交換効率の算出方法〉

$$\varepsilon_p = \frac{\tau_n}{\tau_p}$$

〈各目換気時間の算出方法〉

$$\tau_n = \frac{V}{Q_s}$$

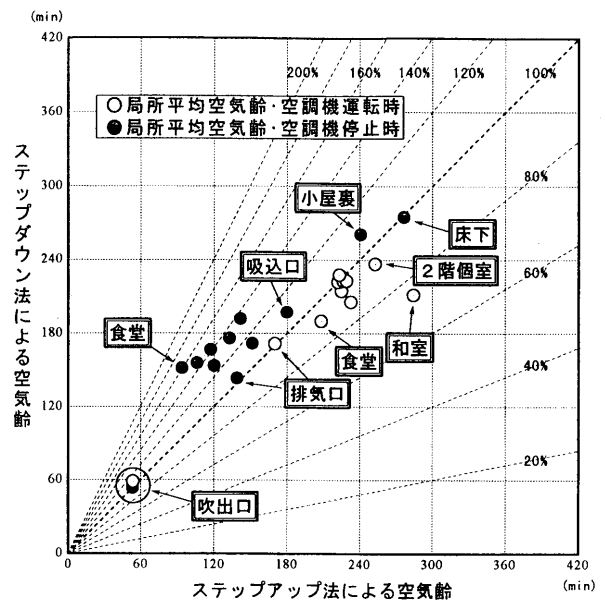


図8 ステップアップ法とステップダウン法による局所平均空気齢 τ_p の比較

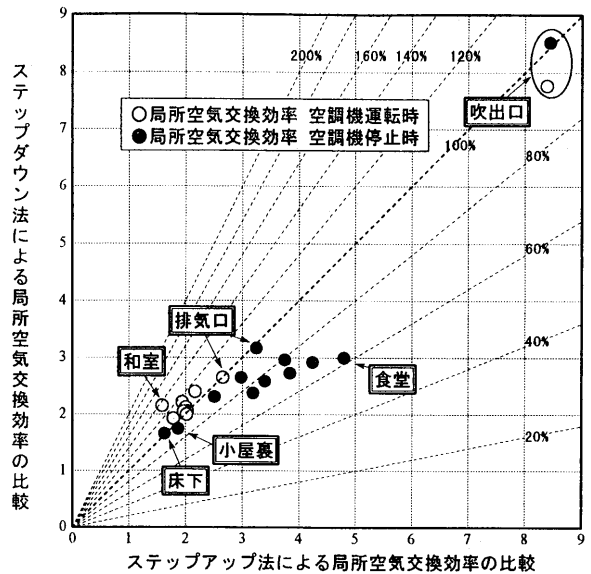


図9 ステップアップ法とステップダウン法による局所空気交換効率 ε_p の比較

5. 結論

(1) 応答係数法を使用し、外部風速および室内外温度差と漏気量の関係の評価し、漏入空気の補正した換気効率指標の算出方法を提案した。

(2) 本報で提案した漏入空気の補正法は、漏入空気による影響を取り除いた定常時の濃度がどの測定点もほぼ一定となり、理論上合致する。しかし、空調機停止時の床下と小屋裏などの機械換気が供給されにくい測定点では、定常時の濃度が変動する傾向が見られる。

謝辞

本研究を行うに当たって、空調調和衛生工学会・換気効率小委員会(主査 村上周三 東大生研教授)における議論が大変参考になった。測定を際して、(株)レック三和の関係各位の御協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

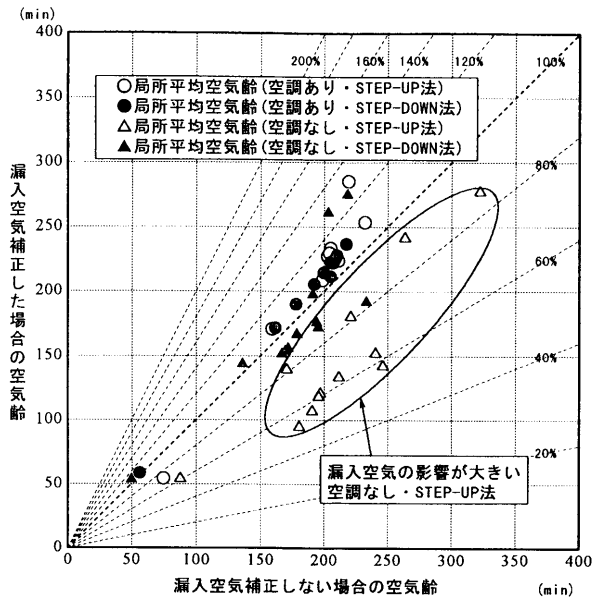


図10 漏入空気補正前後の局所平均空気齢 τ_a の比較

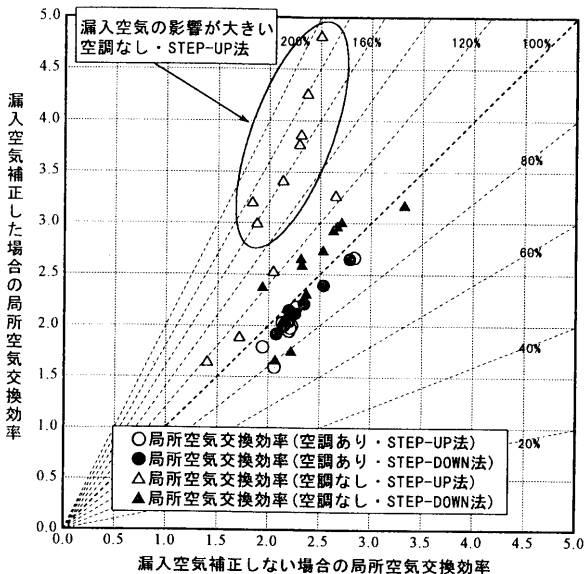


図11 漏入空気補正前後の局所空気交換効率 ε_a の比較

注

1) 住宅のような名目換気時間の長い建物では、漏入空気が室内の任意の点に到達するまでにかかる時間が長くなる傾向がある。そのため外部風速や内外温度差から漏入空気を評価するためには、応答係数を用いた時間スケールの長い解析を行う必要がある。

2) 本論文では、外部風速や内外温度差の単位インパルスにおける、室内の任意の点における漏入空気量の応答を、(5)、(6)式の様と与える。この応答係数は漏入空気が任意の点に到達する度数分布の関数と等しい。度数分布の関数については、不明な部分が多く検討する課題が残っている。これらについては、パルス法によって局所平均空気齢を測定し検討を行う予定である。

3) ASHRAE Handbook (Fundamentals, 1989)¹³⁾では、気密性能の値と外部風速、内外温度差から換気量を推定する式(9)が提案されている。本報ではこれを参考とした。

$$q = \alpha A' (X \Delta T + YV^2)^{1/2} \quad \dots (9)$$

q : 自然換気量 $\alpha A'$: 床面積当たりの相当開口面積
 ΔT : 内外温度差 V : 外部風速 X : 浮力係数 Y : 風圧力係数

参考文献

- 1) 坂口 淳、赤林伸一、原子正生：木造独立住宅を対象とした換気効率の実測 その2 換気・空調システムが設置された住宅における換気効率の実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp127-128、1994年9月
- 2) 坂口 淳、赤林伸一、原子正生：集中換気システムを設置した住宅の換気効率に関する実測調査 その4 3住戸を対象とした換気効率指標の比較と漏気評価手法の提案、日本建築学会北陸支部研究報告集第38号、pp237-240、1995年8月
- 3) ASHRAE Standard (Public Review Draft), Standard Method of Measuring Air Change Effectiveness, BSR/ASHRAE, 1992年
- 4) 奥山博康：換気回路網によるシミュレーションの理論と応用、空調調和衛生工学会学術論文集、pp545-548、昭和58年10月
- 5) 栗岡 均、石田義洋：回路網問題における新解析法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp565-567、昭和59年10月
- 6) 石田建一、鎌田元康、千田善孝、星川邦彦、林 基哉：建物の気密性を用いた換気量の簡易計算法、日本建築学会計画系論文報告集第438号、pp. 23-31、1992年8月
- 7) 木村建一編：建築環境学1、丸善、平成4年4月
- 8) 小林 仁、吉野 博、早瀬 訓：漏入空気に対する空気齢の測定方法に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、pp. 627-628、1996年9月
- 9) 松尾 陽、横山浩一、石野久彌、川元昭吾：空調設備の動的負荷計算入門、建築設備技術者協会、昭和55年3月
- 10) 和達三樹：物理のための数学、岩波書店、1983年3月
- 11) 松尾 陽：測定にもとづく室温予測および暖房性能の評価法について、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp. 337-338、昭和51年10月
- 12) 坂口 淳、赤林伸一：集中換気システムを設置した木造独立住宅の換気効率に関する実測調査 住宅の換気システムに関する研究 その1、日本建築学会計画系論文報告集第488号、pp35-42、1996年10月
- 13) ASHRAE Handbook, Fundamentals, 1989

(1997年7月25日原稿受理、1998年5月8日採用決定)