

高気密住宅の換気システムに関する研究 空気齢を用いた換気効率指標による評価

坂口 淳

1 研究目的

住宅の換気は、主に漏気（自然換気）に頼っている場合が多い。近年、住宅の気密性能の向上に伴い、漏気が減少し室内空気汚染や結露の問題を引き起こしている。本研究は、高気密住宅を対象に、外気が室内の任意の点に到達する平均時間を定義した局所平均空気齢の実測を行い、換気性能の評価手法の確立と住宅における換気計画に関する基礎資料の整備を目的とする。

2 対象住宅の概要（表1）

2.1 対象住宅A

(1)対象住宅の平面（図1）：栃木県鹿沼市に建設された木造軸組工法の2階建住宅である。延べ床面積は108m²、小屋裏、床下を含まない容積は253m³である。

(2)換気設備（図2）：台所に設置された顯熱交換型換気扇で外気を、1階、2階の各居室に供給し、1階の納戸、浴室、便所等から熱交換換気扇を経由して排気する。

(3)気密性能：表1に示す。

2.2 対象住宅B

(1)対象住宅の平面（図3）：新津市に建設され

た木造軸組工法の2階建住宅である。延べ床面積は127m²、容積は小屋裏及び1階床下を含めて497m³である。

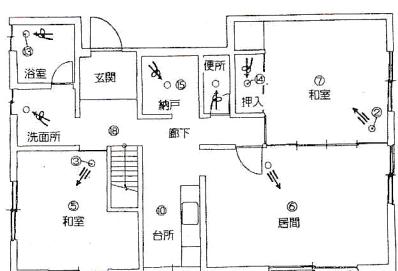
(2)換気設備（図4）：全熱交換型換気扇で外気を1階居間の吹き抜け部分に供給し、便所と浴室から熱交換換気扇を経由して排気する。この住宅には各室の天井に空調用の吸込口が設置されており、1階天井裏、小屋裏を経由して床下に設置された空調機に戻り、1階居間、2階廊下から吹き出す全室冷暖房設備が設置されている。

(3)気密性能：表1に示す。

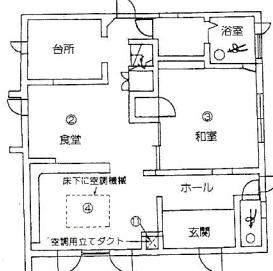
2.3 対象住宅C

(1)対象住宅の平面図（図5）：新津市に建設された木造軸組工法の2階建住宅である。延べ床面積は214m²、容積は小屋裏及び1階床下を含めて765m³である。

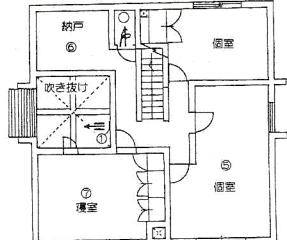
(2)換気設備（図6）：全熱交換型換気扇で外気を1階床下部分に供給する。供給された外気は、1階床下に設置されたファンコイルユニットによって玄関ホール、居間、2階ホールに送風される。浴室、脱衣室、洗面所、便所から熱交換換気扇を経由して屋外に排気



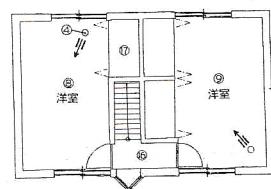
(1) 1階平面図



(1) 1階平面図



(2) 2階平面図



(2) 2階平面図

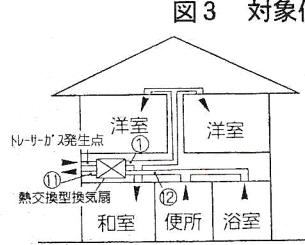


図2 対象住宅Aの換気システム

図1 対象住宅Aの平面と測定点

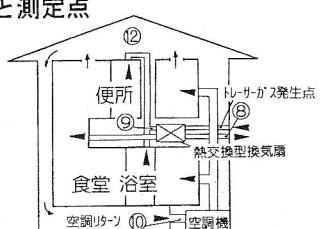


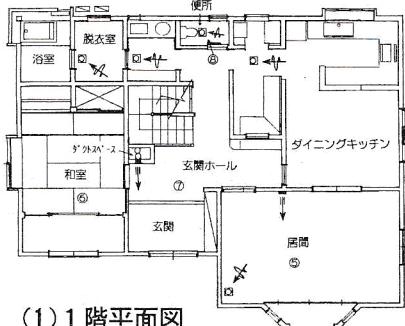
図4 対象住宅Bの換気・空調システム

される。

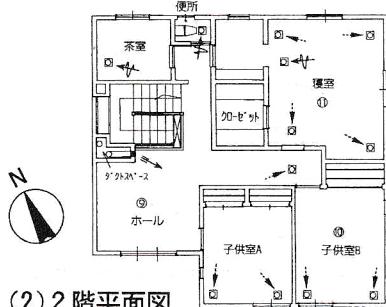
(3) 気密性能: 表1に示す。

3 換気効率測定の概要

3.1 測定方法: トレーサーガス(C_2H_4)を熱交換換気扇の外気取り入れ口で定量供給(住宅Aで 115.2 l/h 、住宅B、Cで 76.8 l/h)し、室内のトレーサーガス濃度の履歴から局所平均空気齢 \bar{T}_P 、局所空気交換効率 ε_P を算出する。ガス濃度の測定には、マルチガスモニタ(B&K1302型)を使用し、図1~6に示す測定点で測定する。測定時には間仕切扉をすべて閉鎖する。吹出口、吸入口以外の測定点は、部屋の中央部の床から1mの居住域の高さで測定を行う。測定期間中の外部風速は、住宅Aでは現地より約10km離れ



(1) 1階平面図



(2) 2階平面図

図5 対象住宅Cの平面と測定点

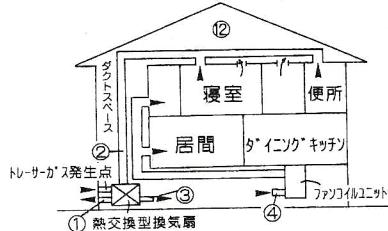


図6 対象住宅Cの換気システム

表1 対象住宅の概要

対象住宅	延床面積	容積	気密性能	
			加圧法	減圧法
住宅A	108 m^2	253 m^3	$10.2\text{ cm}^2/\text{m}^2$	$10.0\text{ cm}^2/\text{m}^2$
住宅B	127 m^2	497 m^3	$3.08\text{ cm}^2/\text{m}^2$	$3.23\text{ cm}^2/\text{m}^2$
住宅C	214 m^2	765 m^3	$1.08\text{ cm}^2/\text{m}^2$	$1.09\text{ cm}^2/\text{m}^2$

た宇都宮気象台で測定した10分間の平均風向風速を、住宅B、Cでは棟上2mで測定した10分間の平均風向風速を使用する。

3.2 実験条件と測定期間: 表2に示す。

4 局所平均空気齢 \bar{T}_P と局所空気交換効率 ε_P の算出(図7)

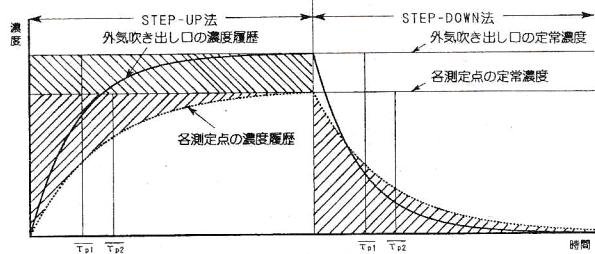
住宅では、オフィスなどと異なり機械換気量と漏気量が同程度である場合が多く、漏気を無視することが出来ない。漏気がある場合には、各測定点での定常時の濃度が一定とならないので、局所平均空気齢等を求めるために新たな算出方法が必要となる。そこで、図7に示す方法で局所平均空気齢 \bar{T}_{P1} 、 \bar{T}_{P2} 、局所空気交換効率 ε_{P1} 、 ε_{P2} 、 ε_{P3} を算出する。

5 対象住宅Aの測定結果

5.1 濃度履歴(図8):ステップアップ法(以下SU法)では、吹出口ではトレーサガスを注入した直後に濃度が約850ppmまで上昇しその後安定する。居住域の濃度は約8時間後に、600ppm前後で安定する。吸入口でも居住域と同様に約8時間後に安定し、定常時の濃度

表2 実験条件と測定期間

対象住宅	条件	期間	外気温	室温	外部風速
住宅A	冷蔵庫無し	1993年11月 1日~11月 3日	$5\sim20^\circ\text{C}$	$16\sim23^\circ\text{C}$	$1\sim6\text{m/s}$
住宅B	B-1 空調運転	1993年12月 2日~12月11日	$1\sim15^\circ\text{C}$	$21\sim32^\circ\text{C}$	$0\sim4\text{m/s}$
	B-2 空調停止	1993年12月13日~12月17日	$0\sim9^\circ\text{C}$	$8\sim26^\circ\text{C}$	$0\sim10\text{m/s}$
住宅C	冷蔵庫無し ファンコイルファンON	1994年 5月30日~ 6月 7日	$14\sim28^\circ\text{C}$	$24\sim26^\circ\text{C}$	$0\sim3\text{m/s}$



局所平均空気齢

- \bar{T}_{P1} [ステップアップ法の場合]
 ハウジング内壁面積を外気吹出口の定常濃度で割った値
- \bar{T}_{P2} [ステップダウン法の場合]
 各測定点の定常濃度

各測定点の濃度履歴

名目換気時間の算出方法

$$\cdot T_{n1} = V/(K/C_s)$$

$$\cdot T_{n2} = V/(K/C_p)$$

局所空気交換効率の算出

$$\cdot \varepsilon_{P1} = T_{n1}/\bar{T}_{P1}$$

$$\cdot \varepsilon_{P2} = T_{n2}/\bar{T}_{P1}$$

$$\cdot \varepsilon_{P3} = T_{n2}/\bar{T}_{P2}$$

記号

$$V: 容積(\text{m}^3)$$

$$K: トレーサーガスの供給量(cc/h)$$

$$Cs: 吸入口の定常濃度(ppm)$$

$$Cp: 各測定点の定常濃度(ppm)$$

$$T_{P1}: 局所平均空気齢①(hour)$$

$$T_{P2}: 局所平均空気齢②(hour)$$

$$T_{n1}: 名目換気時間①(hour)$$

$$T_{n2}: 名目換気時間②(hour)$$

図7 局所平均空気齢、局所空気交換効率の計算方法

は、400ppm前後となるが外部風の影響を受け変動する。ステップダウン法(以下SD法)では、トレーサガスの注入停止後約8時間での測定点でも濃度はほぼ減衰する。

5.2 局所平均空気齢 \bar{T}_p (図9):吹出口では、 \bar{T}_{p1} 、 \bar{T}_{p2} ともに約20分である。吹出口、吸込口のある居住域は、SU法で \bar{T}_{p1} が160～260分、 \bar{T}_{p2} が70～120分の範囲の値に入る。吹出口、吸込口の無い居住域は、SU法で、 \bar{T}_{p1} が220～300分、 \bar{T}_{p2} が120～160分の範囲に入る。吸込口はSU法で \bar{T}_{p1} が280～360分、 \bar{T}_{p2} が120～160分の値となる。

5.3 空気交換効率 ϵ_p (図10)

(1)局所空気交換効率 ϵ_{p1} :SU法では、吹出口のある部屋では0.5～0.8、吸込口では0.3～0.5、吹出・吸込口の無い領域では0.4～0.5の範囲の値となる。

(2)局所空気交換効率 ϵ_{p2} :SU法では、吹出口のある部屋では1.1～1.8、吸込口では0.8～1.1、吹出・吸込口の無い領域では0.8～1.1の範囲の値となり、完全拡散の値とほぼ同様である。

(3)局所空気交換効率 ϵ_{p3} :SU法では、吹出口のある部屋では0.7～1.4、吸込口では0.3～0.6、吹出・吸込口の無い領域では0.5～0.8の値となる。

6 対象住宅Bの測定結果

6.1 濃度履歴(図11、図12):代表的な測定点の濃度履歴を図11(実験B-1)、図12(実験B-2)に示す。吹出口では、トレーサガスの注入開始直後に約650ppmまで上昇し、更に熱交換換気扇のリークにより濃度は上昇し、12時間後に約900ppmとなり定常に達する。居住域では実験B-1、B-2で濃度履歴が

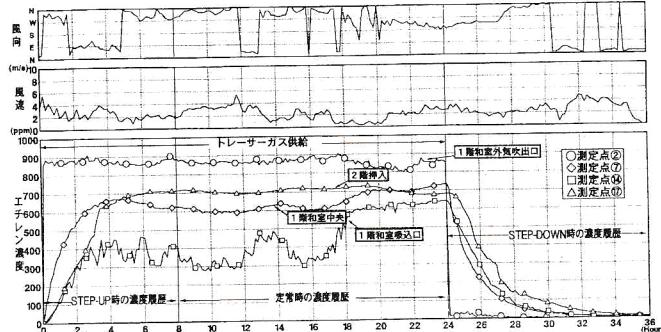


図8 対象住宅Aの濃度履歴と測定結果

異なる。実験B-1(空調機を運転)では、測定点の違いによる濃度差が少なく、定常後の濃度は外部風の影響を受け450ppm～600ppmの範囲で変化する。実験B-2では空調機による室内空気の循環が無いため測定点による濃度の相違が生じる。トレーサガスの注入停止後は約15時間で濃度はほぼ減衰する。

6.2 局所平均空気齢 \bar{T}_p (図13):空調機停止時の実験B-2は、 \bar{T}_{p2} の値にはばらつきがある。実験B-1では \bar{T}_{p1} の値のはらつきが小さく、SU法では400分程度、ステップダウン法では120分程度の範囲に入る。実験B-1、B-2を比較すると小屋裏、床下(空調機が設置)の \bar{T}_{p1} が他の測定点と異なる。これは空調機による循環風量の有無によるものと考えれる。

6.3 局所空気交換効率 ϵ_p (図14)

(1)局所空気交換効率 ϵ_{p1} :実験B-1では、吹出口を除きSU法では0.8～1.2、SD法では、2.5～5.5の範囲に入る。SD法の ϵ_{p1} が比較的大きな値となるのは、吹出口での濃度か

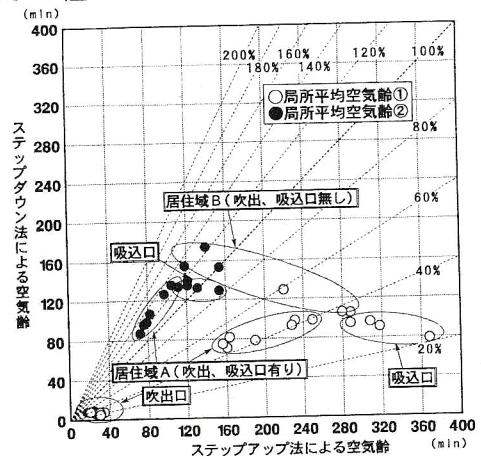


図9 ステップアップ法とステップダウン法による局所平均空気齢 \bar{T}_{p1} 、 \bar{T}_{p2} の比較

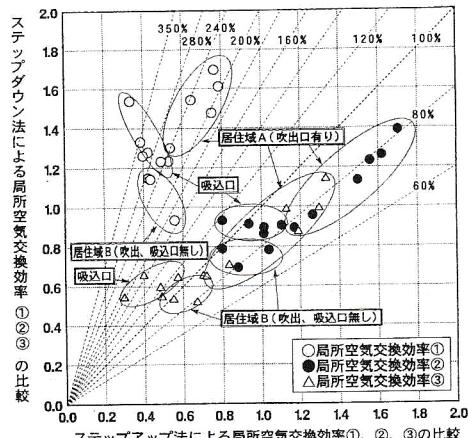


図10 ステップアップ法とステップダウン法による局所空気交換効率 ϵ_{p1} 、 ϵ_{p2} 、 ϵ_{p3} の比較

算出した T_{n1} を用いて ε_{p1} を算出したことが原因と考えられる。実験B-2では、測定によるばらつきが実験B-1に比較して相対的に大きい。

(2) 局所空気交換効率 ε_{p2} : SD法とSU法のはほぼ同様の値となる。実験B-1では1.5~3.3、実験B-2では1.0~2.3の範囲に入り、空調停止の場合は測定点によるばらつきが大きくなる。

(3) 局所空気交換効率 ε_{p3} : SU法とSD法はほぼ同様の値となり、 ε_{p2} と比較すると約6割程度の値となる。実験B-1では0.9~1.1、実験B-2では0.5~1.5の範囲に入る。

■ 対象住宅Cの測定結果

7.1 濃度履歴(図15): 熱交換換気扇の給気口、排気口はトレーサガス注入開始直後に約200ppmまで上昇し、熱交換換気扇のリークにより約24時間で約420ppmまで上昇する。その他の測定点は測定点の違いによる濃度の差は少なく、約24時間で定常に達し約450ppmで安定する。トレーサガス注入停止後は約30時間で減衰する。

7.2 局所平均空気齢 T_p (図16): 熱交換換気扇の給気口、排気口は T_{p1} 、 T_{p2} ともに約250分である。排気口の T_p が給気口と同じ

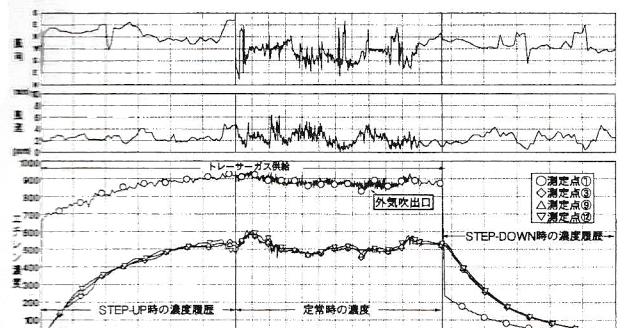


図11 対象住宅Bの濃度履歴と測定結果
(実験B-1 空調機を運転)

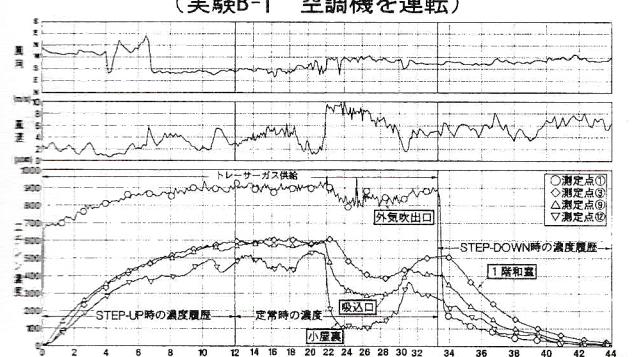


図12 対象住宅Bの濃度履歴と測定結果
(実験B-2 空調機を停止)

なのは、熱交換換気扇内部のリークが多い為と考えられる。1階居住域では T_{p1} のSU法で約700分、 T_{p2} で約350分となる。2階居住域では T_{p1} のSU法で約800分、 T_{p2} で約450分となる。小屋裏は T_{p1} のSU法で約850分、 T_{p2} で約550分の値となる。

7.3 局所空気交換効率 ε_p (図17)

(1) 局所空気交換効率 ε_{p1} : SU法では、熱交換換気扇の給気、排気口は1.0~1.2の範囲に入り、その他の測定点は約0.4となる。

SD法では、熱交換換気扇の給気、排気口が1.2、1階の居住域は0.8~0.9、2階居住域及び小屋裏が0.4となる。

(2) 局所空気交換効率 ε_{p2} : SD法の方がSU法より局所空気交換効率が約2倍大きい。SU法で熱交換換気扇の給気、排気部分は1.0、そ

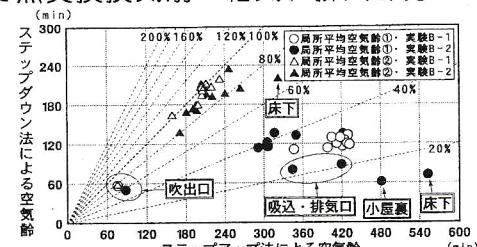


図13 ステップアップ法とステップダウン法による局所平均空気齢 T_{p1} 、 T_{p2} の比較

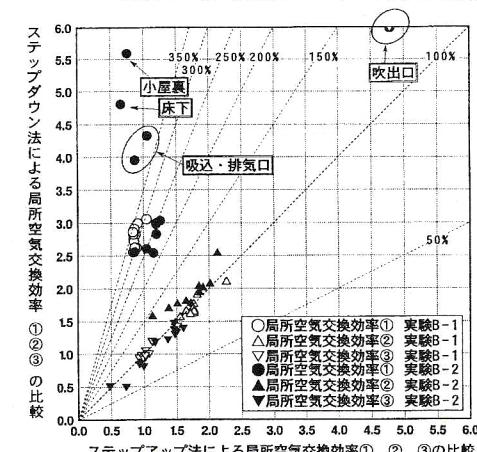


図14 ステップアップ法とステップダウン法による局所空気交換効率 ε_{p1} 、 ε_{p2} 、 ε_{p3} の比較

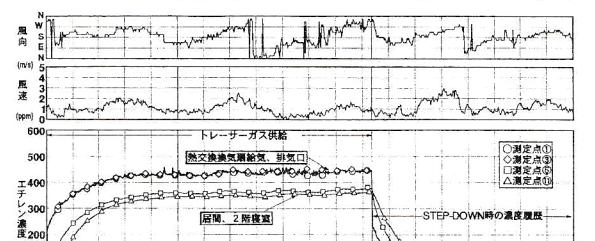


図15 対象住宅Cの濃度履歴と測定結果

ら算出した T_{p1} を用いて ϵ_{p1} を算出したことが原因と考えられる。実験B-2では、測定点によるばらつきが実験B-1に比較して相対的に大きい。

(2) 局所空気交換効率 ϵ_{p2} : SD法とSU法のはほぼ同様の値となる。実験B-1では1.5~2.3、実験B-2では1.0~2.3の範囲に入り、空調停止の場合は測定点によるばらつきが大きくなる。

(3) 局所空気交換効率 ϵ_{p3} : SU法とSD法はほぼ同様の値となり、 ϵ_{p2} と比較すると約6割程度の値となる。実験B-1では0.9~1.1、実験B-2では0.5~1.5の範囲に入る。

7 対象住宅Cの測定結果

7.1 濃度履歴(図15): 熱交換換気扇の給気口、排気口はトレーサガス注入開始直後に約200ppmまで上昇し、熱交換換気扇のリークにより約24時間で約420ppmまで上昇する。その他の測定点は測定点の違いによる濃度の差は少なく、約24時間で定常に達し約450ppmで安定する。トレーサガス注入停止後は約30時間で減衰する。

7.2 局所平均空気齢 T_p (図16): 熱交換換気扇の給気口、排気口は T_{p1} 、 T_{p2} ともに約250分である。排気口の T_p が給気口と同じ

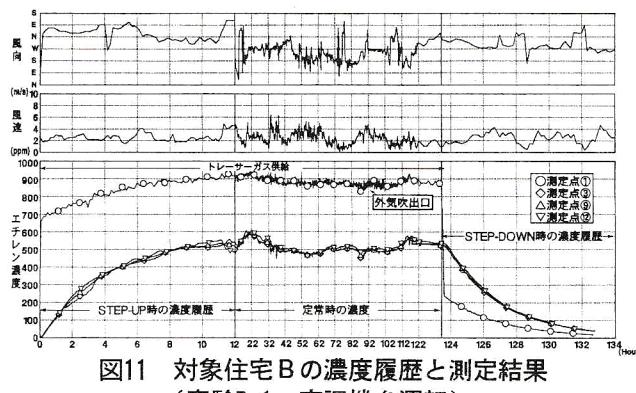


図11 対象住宅Bの濃度履歴と測定結果
(実験B-1 空調機を運転)

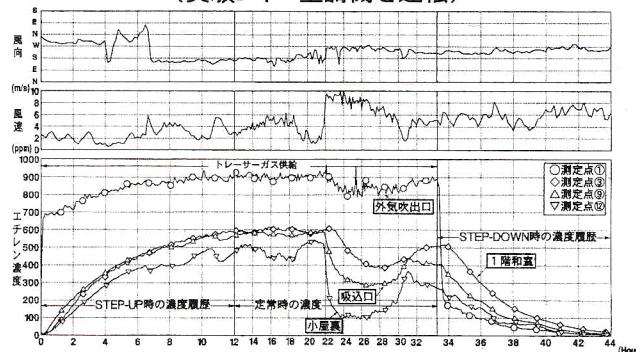


図12 対象住宅Bの濃度履歴と測定結果
(実験B-2 空調機を停止)

なのは、熱交換換気扇内部のリークが多い為と考えられる。1階居住域では T_{p1} のSU法で約700分、 T_{p2} で約350分となる。2階居住域では T_{p1} のSU法で約800分、 T_{p2} で約450分となる。小屋裏は T_{p1} のSU法で約850分、 T_{p2} で約550分の値となる。

7.3 局所空気交換効率 ϵ_p (図17)

(1) 局所空気交換効率 ϵ_{p1} : SU法では、熱交換換気扇の給気、排気口は1.0~1.2の範囲に入り、その他の測定点は約0.4となる。

SD法では、熱交換換気扇の給気、排気口が1.2、1階の居住域は0.8~0.9、2階居住域及び小屋裏が0.4となる。

(2) 局所空気交換効率 ϵ_{p2} : SD法の方がSU法より局所空気交換効率が約2倍大きい。SU法で熱交換換気扇の給気、排気部分は1.0、そ

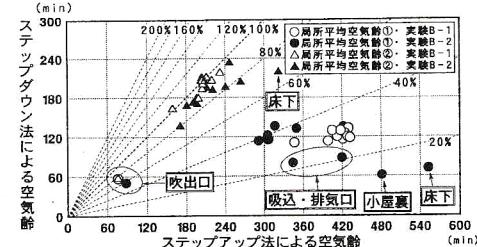


図13 ステップアップ法とステップダウン法による局所平均空気齢 T_{p1} 、 T_{p2} の比較

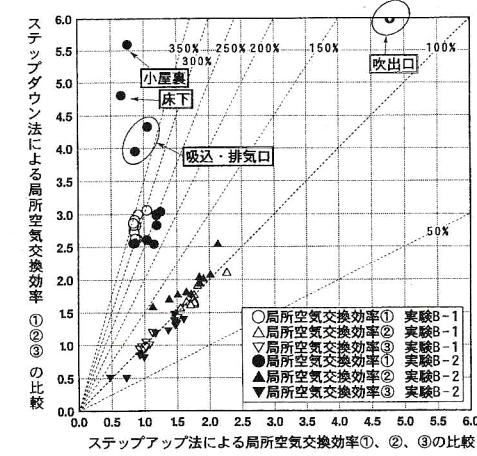


図14 ステップアップ法とステップダウン法による局所空気交換効率 ϵ_{p1} 、 ϵ_{p2} 、 ϵ_{p3} の比較

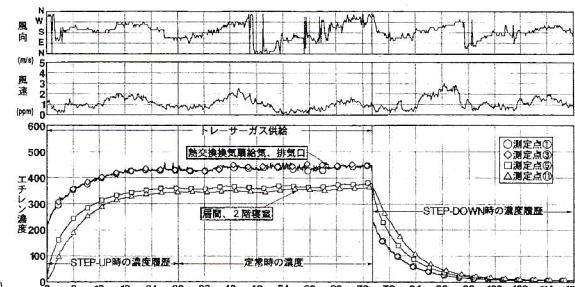


図15 対象住宅Cの濃度履歴と測定結果

の他の測定点は約0.3の値となる。

(3)局所空気換気効率 ε_{P3} :熱交換換気扇の給気、排気部分は1.0~1.2の範囲に入る。1階の居住域は0.6~0.7、2階居住域は0.5、小屋裏は0.4となる。SU法、SD法はともに同様な値となる。

S 対象住宅A、B、Cの比較

8.1 热交換換気扇の給排気風量とリーク量

定常時の熱交換換気扇の給気、排気、還気部分の濃度から熱交換換気扇の給排気風量および熱交換換気扇内部で熱交換されずに給気あるいは排気される空気のリーク量を表3に示す。算出方法は表4に示す。住宅Aは顕熱型換気扇であるのでリーク量が少なく、住宅BCは、全熱交換型換気扇であるので相対的にリーク量が多い。

8.2 局所平均空気齢 \bar{T}_P :SD法による \bar{T}_{P1} はSU法による \bar{T}_{P1} に比較して約2~5割程度の範囲に入り、漏気の影響が顕著である。

\bar{T}_{P2} はSU法、SD法とともにほぼ同様な値となる。外気吹出口(熱交換換気扇の給気部分や室内の吹出口)の \bar{T}_P は、極めて短いと考えられるが、熱交換換気扇の内部のリークにより熱交換換気扇に入る排気が、また室内に供給されるために長くなる。住宅Aの居住域の \bar{T}_P は比較的短い理由は、①熱交換換気扇内部のリークが少ない。②対象住宅の容積が小さい。③部屋全てに外気吹出口がある。④気密性能が低く、外気の漏入が多いため。と考えられる。また、住宅Cの居住域の \bar{T}_P が比較的長いのは、①熱交換換気扇のリーク量が多く、取り入れられた外気が減少している。②住宅の容積が大きい。③ファンコイルユニットによって住宅全体の空気をかき混ぜているため。非居住域の影響があるため。④気密性能が高く、漏気が少ない。と考えられる。

8.3 局所空気交換効率 ε_P :空調機やファンコイルユニットによって住宅全体の空気を循環すると、測定点の違いによる ε_P のばらつきが小さくなる。住宅A、Bは、ほぼ完全拡散時の値の1に近く、取り入れた外気は、居住域に均等に分配されていると考えられる。住宅Cの場合他の住宅に比べて空気交

換効率が小さい原因是、取り入れた外気が熱交換換気扇内部でショートサーキットしているためであると考えられる。

9 漏気を考慮した局所平均空気齢、局所空気交換効率の算出

室内の漏気量は、屋外の外部風速と内外温度差によって変化する。これまで示した局所平均空気齢および局所空気交換効率は、

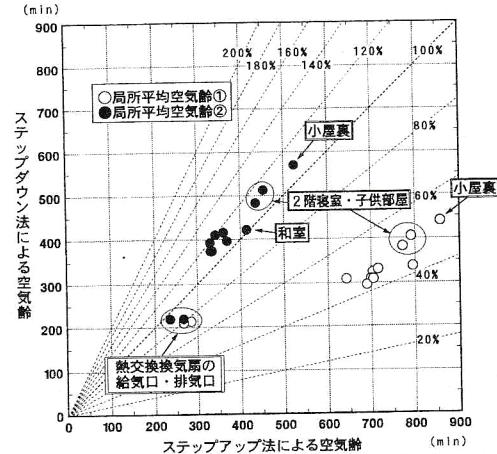


図16 ステップアップ法とステップダウン法による局所平均空気齢 T_{P1} 、 T_{P2} の比較

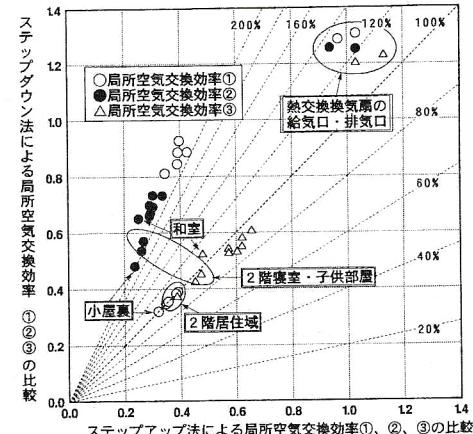


図17 ステップアップ法とステップダウン法による局所空気交換効率 ε_{P1} 、 ε_{P2} 、 ε_{P3} の比較

表3 热交換換気扇の給排気風量とリーク量

対象住宅	給気口濃度	排気口濃度	還気口濃度	給排気風量	リーク風量	取り入れ外気量	換気回数 (名目換気時間)
住宅A	881.9ppm	498.2ppm	464.3ppm	126m³/h	9m³/h	117m³/h	2.2回/h(27.7分)
住宅B	877.4ppm	502.6ppm	584.1ppm	80m³/h	14m³/h	66m³/h	7.6回/h(7.97分)
住宅C	436.0ppm	433.0ppm	349.2ppm	148m³/h	74m³/h	74m³/h	10.3回/h(5.80分)

表4 热交換換気扇の給排気風量とリーク量の算出方法

$$Q = K/C_0 = K/(C_e + C_s - C_r)$$

$$L_e = Q \cdot (C_e - C_r) / (C_o - C_r)$$

記号: K: トーレーサーガスの供給量(cc/h)

C_s: 热交換換気扇の給気のガス濃度(ppm)

C_r: 热交換換気扇の還気のガス濃度(ppm)

C_e: 热交換換気扇の排気のガス濃度(ppm)

C_o: 热交換換気扇の外気のガス濃度(ppm)

Q: 热交換換気扇の給排気風量(m³/h)

L_e: 热交換換気扇内部のリーク量(m³/h)

漏気が常に一定であることを仮定している。正確な解析を行うために、漏気の空気齡を考慮にいれた計算を行う必要がある。

本研究では、外部風速と室内外温度差を考慮条件として応答係数法を用いて漏気量を評価し濃度履歴を補正する方法を採用する。解析の詳細を表5に示す。計算は住宅Bを行なう。

9.1 濃度履歴(図18、図19):漏気補正後の濃度履歴は当然のことながら定常時の濃度などの測定点もほぼ一定となる。しかし、実験B-2の空調機停止時の床下と小屋裏は、換気換気が供給されにくいため、定常時の濃度が変動し、漏気の効果を取り除いたとは言いがたい。

9.2 局所平均空気齡 \bar{T}_P (図20):補正後の濃度履歴から算出した \bar{T}_P は、SU法とSD法はほぼ同様な値となり、 \bar{T}_P は \bar{T}_{P2} と近い値とな

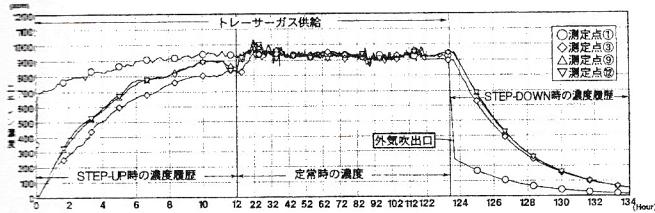


図18 漏気補正後の濃度履歴(実験B-1 空調機運転時)

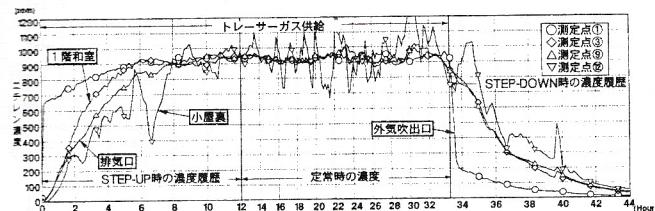


図19 漏気補正後の濃度履歴(実験B-1 空調機停止時)

表5 漏気を考慮した \bar{T}_P 、 ε_P の算出方法

室内のある点のトレーサガス量

$$Q \cdot C_p(t) = (Q - L_e) \cdot \int_0^t C_s(t-u) du / \left\{ Q + \int_0^t \omega(t-u) du \right\}$$

定常時の外気吹出口のトレーサガス量

$$(Q - L_e) \cdot \int_0^t C_s(t-u) du = K \cdot (Q^2 - L_e^2) / Q$$

外部風速と室内外温度差の重み関数

$$\phi_{w_i}(t) = A_{w_i} + B_{w_i} e^{-\lambda t} \quad \phi_T(t) = A_T + B_T e^{-\lambda t}$$

応答係数計算式

$$\int_0^t \omega(t-u) du = \sum_i \int_0^t W_i(t-u) \phi_{w_i}(t) du + \int_0^t \sqrt{\theta(t-u)} \cdot \phi_T(t) du$$

濃度補正式: $M_p(t) = C_p(t) \cdot \{ Q + \int_0^t \omega(t-u) du \} / Q$

計算は60個の応答係数、二等辺三角波で計算。時間刻みは10分。

外部風速はN, E, S, Wの4要素($i=1 \sim 4$)。

(記号) Q:給気風量 L_e:熱交換換気扇内部に生じるリーキ量

C_s:熱交換換気扇の給気のトレーサガス濃度 C_p:室内の任意の点のトレーサガス濃度

ω:漏気の応答関数 K:トレーサガス供給量 φ_{w_i}(t):外部風速の応答関数

W_i(t):外部風速 φ_T(t):室内外温度差の応答関数 θ(t):室内外温度差

M_p:漏気補正後の室内の任意の点のトレーサガス濃度

るが、外気吹出口に近い測定点ほど \bar{T}_P が短い点で良く評価している。

9.3 局所空気交換効率 ε_P (図21): ε_P は、SU法とSD法はほぼ同様な値となり、 ε_P は ε_{P2} と近い値となる。

10 結論

- (1)居住域の \bar{T}_P を短くし ε_P を高くするためには、①熱交換換気扇内部のリークを少なくする。②換気風量が多くする。③居住域に直接外気吹き出す。ことが考えられる。
- (2)空調用の循環ファンを運転し、室内の空気を混合させると \bar{T}_P および ε_P の測定点の違いによるばらつきは小さくなる。しかし、非居住域も換気することになるので、居住域の換気効率指標は若干悪くなる。
- (3)応答係数法を使用し、外部風速と室内外温度差から漏気量を評価し、漏気を補正した換気効率指標の算出方法を提案した。

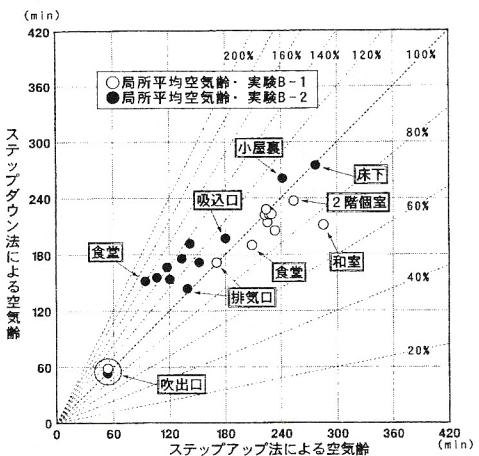


図20 ステップアップ法とステップダウン法による局所平均空気齢 \bar{T}_P の比較

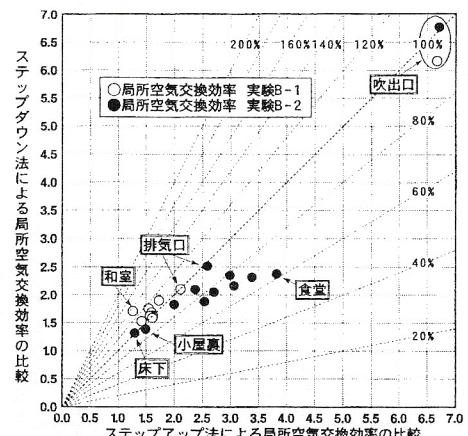


図21 ステップアップ法とステップダウン法による局所空気交換効率 ε_P の比較

指導教官：赤林 伸一 助教授