横風時における単一開口換気の特性に関する実験的研究

片壁面上のみに開口を有する居室の換気性状に関する研究 (その1)

WIND TUNNEL EXPERIMENT OF VENTILATION
WITH A SINGLE OPENING IN CROSS WIND

The study on characteristics of ventilation with single-sided opening Part 1

河野良坪*, 加藤信介**, 大岡龍三***, 高橋岳生****

Ryohei KONO, Shinsuke KATO, Ryozo OOKA
and Takeo TAKAHASHI

In this study, the characteristics of wind induced ventilation with single-sided opening are analyzed with wind tunnel experiment. In some experimental cases, a small wind break is attached on an opening in order to increase amount of air flow rate. (It is assumed that the break is an opened window itself so that the window is pivoted one whose vertical axis is placed at center of window.) The normalized airflow rate 'k' in the case of a standard single-sided opening is 0.024. On the other hand, 'k' in the case where a small wind break is attached vertically to the opening is 0.156. This value is about 6.5 times as much as 'k' in the case of a standard single-sided opening.

In other experimental cases, circulation flow is made in a room in order to increase air flow rate. Synergy effect of fresh air entering from an opening and circulation flow is expected. The normalized airflow rate 'k' in the case of a standard single-sided opening with circulation is able to increase more than 'k' without circulation. In some cases however, 'k' with circulation is reduced due to shortcut.

Keywords: Single-sided ventilation, Natural ventilation, Wind tunnel experiment

片側開口換気, 自然通風利用, 風洞模型実験

1. はじめに

従来、自然通風は居室の風上と風下の壁面それぞれに開口窓が存在することが前提であった。しかし、最近の住宅では片側壁面上のみに開口窓が設置されることが多く、十分な換気量は期待出来ない。ただし、風が開口面に平行に流れる横風時においてある程度の換気性能を確保することは可能であり、この場合について Warren ら^{1), 2)} は片側開口換気のみを詳細に分類した上で、開口部で生じる混合層^{注1)}中の乱れによる効果が主要素であると考え、室内一様発生時の室平均濃度^{注2)}から換気量予測の概算式について言及した。また、山中ら³⁾はこの混合層理論に基づき、瞬時一様拡散濃度^{注3)}から概算式を提示した。

片側開口換気は2開口通風と比較して同一開口で流入流出が生じるためショートカットが生じやすく、瞬時一様拡散では実現象を捉えきれない。本研究では換気量を室平均空気齢(室内一様発生時の室平均濃度に対応^{注4)})と関係づけ実質的な換気量を前提とした検討を加える。

なお、このような一開口で流入流出が生じショートカットが起こり得るケースでは、室内に生じる循環流を活用して流入空気を室内奥まで輸送し、室内奥の空気を流出面に輸送することで、この実質的な換

気量を示す室平均空気齢を小さく(すなわち換気量を大きく)することが可能と思われる。この点に関して一開口通風を検討した例は未だ無い(筆者らの既往の研究^{4), 5)}を除く)^{注5)}。本論文では、横風時に簡単な手法で室内に取り込む新鮮空気を増加させ、更に室内に発生させる循環流により新鮮空気を室の奥深くまで効率的に輸送し、実質的な換気性能の向上を図る手法の検討を行う。

尚、筆者らは試験的に Re 数 = 約 4,700 の条件下でこれらの検討を既に行なっている^{4), 5)}。本報では、実験方法に改良を加えて、主に Re 数 = 約 20,000 の条件下で新たに得られた知見を示す。

2. 横風時における1開口モデルの通風性状

2. 1 検討モデル

一開口通風として、ここでは開口面と風向が平行の場合を想定する。この風を取り入れ又、同時に排出する。これをモデル化し、一様流中に流れに平行に設置された平面に開けられた矩形の開口で流入、流出が生じる室内モデルを検討する。室内モデルを図1に示す。

2. 2 実験条件

幅 2.2m、高さ 1.8m、長さ 16.5m の測定胴を持つ境界層風洞(東大

* 東京大学大学院工学系研究科 大学院生・修士(工学)
(日本学術振興会特別研究員)

** 東京大学生産技術研究所 教授・工博

*** 東京大学生産技術研究所 助教授・博士(工学)

**** 東京大学生産技術研究所 技術専門職員

Graduate Student, the University of Tokyo, M. Eng.
(JSPS Research Fellow)

Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

Technical Assoc., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo

生研所属)を使用。風路は循環型とする。風洞内状況を図1、写真1に示す。片側開口(2mm厚)を持つ模型箱を平板下に埋設させて設置した。模型箱は、内寸200mm角の立方体模型とし、模型開口表面と平板表面は同一面とする。接近流の風速分布を開口直前となるべく一様とさせるため、平板により風洞気流を風洞床面高さ240mmで分断(平板面を基準高さ $Z=0$ とする)。平板先端から開口迄の距離は境界層の発達と模型箱による閉塞の影響から調整した。平板上の垂直風速分布を図2に示す。一様流代表風速 $U_L=6.0\text{m/s}$ (開口を閉じた状態での、開口中央に相当する位置の上方、 $Z=200$ における風速)、 Re 数=約20,000である(開口幅を代表長さとする)。

2.3 測定概要

図3に実験装置概要図を示す。換気量はエチレンをトレーサースガスとし、連続供給法により測定。室内平均空気齢の測定を行うため、供給・吸引共に均等に32本ずつ配置した内径1mmのパイプで室内にトレーサースガスを250sccmで放出し同じくサンプルして、その平均濃度をFIDで測定する。あらかじめ風洞内部におけるバックグラウンド濃度について検討を行った結果、長時間トレーサースガスを供給してもバックグラウンド濃度の上昇がほとんどないことを確認している。

2.4 実験ケース

表1~3に実験パターンを示す。CASE1~8では一開口モデルの基本的な換気性能の把握を目的とする。特に、開口内に気流を誘引する目的で板材を設置して縦軸回転窓の換気特性について検討する。CASE9~33では、縦軸式ではあるが通常と異なる窓の開き方をモデル化し、開口窓の新規開発用データの収集を目的とする。

2.5 実験結果

各結果は基準化した換気量 k として示す。

$$k = Q_E / (A \cdot U_L) \cdots \text{基準化換気量}$$

A $\cdots$ 総開口面積(m^2)

表1 実験パターン(単一開口基本モデル) 括弧内はCASE1との比

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
平面図				
立断面図				
種別	単一開口 (基準形式)	単一開口 (主流方向に長い)	単一開口 + ペーン 45° (縦軸回転窓)	単一開口 + ペーン 90° (縦軸回転窓)
換気基準化	0.024 (1.0)	0.030 (1.3)	0.074 (3.1)	0.156 (6.5)

	CASE5	CASE6	CASE7	CASE8
平面図				
立断面図				
種別	単一開口 + 半ペーン (上側配置)	単一開口 + 半ペーン (下側配置)	単一開口 (大)	単一開口(大) + ペーン 90° (縦軸回転窓)
換気基準化	0.052 (2.2)	0.015 (0.6)	0.022 (0.9)	0.169 (7.0)

Q_E 注6) ... (実質的な) 換気量(m^3/s) (室平均空気齢に対応)

U_L ... 開口近傍の風速 ($Z=200$ の風速) (m/s)

2. 5. 1 縦軸回転窓を備えた単一開口モデルの測定換気量 (表 1 参照)

(1) 単一開口基本モデル (CASE1, 2)

標準の単一開口 (CASE1) の基準化換気量は 0.024。これは外部風速が実質的に室内換気に寄与する割合は僅か 2.4% 程度に過ぎないことを意味する。開口面の風下側付近において断続的ながら、外気が室内に流入する傾向が見られる (写真 2-1, 2-2 参照)。

面積は等しく主流方向に 2 倍長い開口 (CASE2) の基準化換気量は 0.030 となる。主流方向に開口が長い程、乱流拡散を生ずる混合層が発達し、生成される渦のスケールと量が増加すると考えられる。

(2) 縦軸回転窓 (CASE3~8)

単一開口 (CASE1) にペーンを 45° で付した場合 (CASE3) に換気量は 3.1 倍の増加を示す。単一開口 (CASE1) の場合、開口面風下側で流入、風上側で流出となる (LDV により開口面風速を確認済) が、ペーンが気流をせき止めることで、ペーンの風上側開口で流入、風下側で流出となり開口部通過風量は増加する (写真 2-3 参照)。ペーンを直角にして付した場合 (CASE4) には単一開口時 (CASE1) の 6.5 倍増となる。ペーンを直角に設置したことで風から見たペーンの見付け面積が増加し、また、壁面の影響がより少ない高い位置で外気の捕獲が可能となるため、 45° の場合の 2 倍程度の換気量が得られると考えられる (写真 2-4 参照)。

ペーンを上側半分 (CASE5)、及び下側半分 (CASE6) のみ設置した場合の換気量を単一開口の場合 (CASE1) と比較すると、CASE5 では 2.2 倍、CASE6 では 0.6 倍程度を示す。ペーン上側のみである程度の換気量は得られるが、下側のみでは効果は無い。ペーンによる気流の誘引は主に開口面よりも上側で行われ、ペーンの下側が開口面付近に流入した気流を室の奥まで誘導するため、ペーンの上側と下側の相乗効果により、普通のペーン 90° (CASE4) では上側半分のみとした場合 (CASE5) の 3 倍近い換気量になると考えられる (写真 2-4~2-6 参照)。

基本ケース (CASE1) の約 2 倍の開口 (CASE7) の基準化換気量は 0.022 となり、単位面積当りの換気量の値としてはほとんど変化しない。CASE7 に開口と同じ寸法のペーンを付した場合 (CASE8) に換気量は約 7.7 倍増加し、CASE1 と CASE4 の関係とほぼ等しい傾向を示す。

2. 5. 2 テストケース及び新規開発モデル (表 2, 3 参照)

2. 5. 1 節において既存の縦軸回転窓は高い換気性能を持つことを確認した。しかし、縦軸回転窓は室内側への張り出しが大きく、 90° に開いて使用されることは経験上少ない。ここでは数パターン of テストケースを行い、特に、 45° 程度開いた場合においてもある程度の換気量が担保されるような、単一開口窓の形態を検討する。

(1) 単一開口 (CASE1) + 補助板 (CASE9~12)

単一開口 (CASE1) に気流を誘引する目的で、開口の半サイズの補助板 (2mm 厚) を風下側外壁面上に垂直に設置した (CASE9) ところ、基準化換気量は 0.072 に増加した。建物外壁面に若干の工夫を加えることで簡易に通風性状が改善できる可能性を示唆している。但し、補助板を風上風下の両側に設置する (CASE10) と基準化換気量は 0.033、多少風が通り易くなるように両側の補助板を更に半分とした (CASE11) 場合でも 0.043 程度に止まり、両風向への対応は難しいと思われる。

一方、ペーンを直角で設置したケース (CASE4) の上端に開口の半サ

表 2 実験パターン (新型開口モデル I) 括弧内は CASE1 との比

	CASE9	CASE10	CASE11	CASE12
平面図				
立面図				
種別	単一開口 + 補助板 ①	単一開口 + 補助板 ②	単一開口 + 補助板 ③	単一開口 + ペーン 90° + 補助板
換気基準化	0.072 (3.0)	0.033 (1.4)	0.043 (1.8)	0.159 (6.6)

	CASE13	CASE14	CASE15	CASE16
平面図				
立面図				
種別	単一開口 + 長ペーン (外側 0.25L)	単一開口 + 長ペーン (外側 0.375L)	単一開口 + 長ペーン (外側 0.5L)	改良型窓 ① 45°
換気基準化	0.190 (7.9)	0.202 (8.4)	0.212 (8.8)	0.079 (3.3)

	CASE17	CASE18	CASE19	CASE20
平面図				
立面図				
種別	改良型窓 ② 45° (順向)	改良型窓 ② 45° (逆向)	改良型窓 ③ 45°	改良型窓 ③' 45°
換気基準化	0.086 (3.6)	0.055 (2.3)	0.032 (1.3)	0.029 (1.2)

イズの補助板 (0.5mm 厚) を載せた (CASE12) が、換気量に差は見られなかった。可視化からは、補助板を載せることで補助板高さから下の空気が上方に逃げ難くさせるように見えるが、同時にペーン上端で発生する剥離気流の角度が水平に近付くため、再付着位置が開口側に近付き流出気流が抑制されるのではないと思われる (写真 2-4, 2-7 参照)。

(2) ペーンの高さと換気量の関係 (CASE4, CASE13~15)

縦軸回転窓 (CASE4) の室内側の出幅は変えず、室外側の幅のみを段階的に伸張させた場合の換気量の推移を見る。CASE4 の基準化換気量 0.156 を基準値として考えると、出幅が開口幅と同等の場合 (CASE13) は 2 割程度換気量の増加が見られるが、これ以上出幅を伸ばしても

(CASE14, 15)、換気量の増加率は存外に少ない。出幅が長くなれば上空の動圧を捉え易くなるであろうが、ベーン前後の圧力差も高まり、気流自身がベーンの左右からベーン背後に直接回り込む比率が増加するものと思われる。

(3) 縦軸回転機構を利用した開口窓の開発モデル

(CASE16~20)

改良型窓①(CASE16)は CASE1 に対して約 3.3 倍の基準化換気量の増加が見られた。風上側開口から気流が侵入し、風下から排出されることが考えられ、本質的にはベーン 45°(CASE3)の換気性状に近似していると思われる(写真 2-8 参照)。

CASE17 は CASE1 の 3.6 倍程度の換気量が得られた。ここで室内側のベーンは流入気流の長い誘導路となり、室外側のベーンは流出経路を確保する役割を想定している(流入経路を分割し、外部風に逆らわないように空気の交換を行なうことを目的としている)。縦軸回転窓(CASE3, 4)のように外部気流をベーンに衝突させる形をとらないが、長いベーンが室内空気流動のサイズを大きくすることで比較的大きな換気量が得られると思われる(写真 2-9 参照)。ただし、風向が左右逆となる場合(CASE18)には得られる換気量は低減し、CASE1 の

2.3 倍程度にとどまる。

改良型窓②(CASE19)は CASE1 の 1.3 倍程度の換気量しかない。次にこれを空中に浮かせて(CASE20)上空の動圧を引き込むことを狙いとしたが、逆に換気量は低減した。室の奥まで届く前にベーンと壁面との間で気流が抜けるため、上空で捉えた動圧の一部はショートカットして流出するものと考えられる。

(CASE21~25)

開口窓を 2 分割し、その短辺を軸とする外開き開口(改良窓④)、及びその派生型窓(改良窓⑤、⑥)について検討する(CASE21)。検

表 3 実験パターン(新型開口モデルⅡ) 括弧内は CASE1 との比

(平面図)

改良型窓 ④ (開き角度: 45°)

実験ケース	a	b	基準化換気量 括弧内は CASE1 との比
CASE21	1W	0W	0.128 (5.3)

(平面図)

改良型窓 ⑤ (開き角度: 45°)

実験ケース	a	b	基準化換気量 括弧内は CASE1 との比
CASE21	1W	0W	0.128 (5.3)
CASE22	0.67W	0.33W	0.099 (4.1)
CASE23	0.5W	0.5W	0.071 (3.0)

流入側
流出側

改良型窓 ⑥ (開き角度: 45°)

実験ケース	a	b	基準化換気量 括弧内は CASE1 との比
CASE21	1W	0W	0.128 (5.3)
CASE24	0.67W	0.33W	0.107 (4.5)
CASE25	0.5W	0.5W	0.084 (3.5)

改良型窓 ⑦ (開き角度: 45°)

実験ケース	a	b	基準化換気量 括弧内は CASE1 との比
CASE3	0.5W	0.5W	0.074 (3.1)
CASE26	0.625W	0.375W	0.069 (2.9)
CASE27	0.75W	0.25W	0.052 (2.2)
CASE28	0.875W	0.125W	0.043 (1.8)
CASE29	1W	0W	0.042 (1.8)

改良型窓 ⑦' (開き角度: 90°)

実験ケース	a	b	基準化換気量 括弧内は CASE1 との比
CASE4	0.5W	0.5W	0.156 (6.5)
CASE30	0.625W	0.375W	0.176 (7.3)
CASE31	0.75W	0.25W	0.145 (6.0)
CASE32	0.875W	0.125W	0.142 (5.9)
CASE33	1W	0W	0.058 (2.4)

1) 単一開口・水平開口面から 20mm 下面 (CASE1)

2) 単一開口 (0.25L × 0.25L・壁厚 2mm) (CASE1)

3) 単一開口 + ベーン 45° (CASE3)

4) 単一開口 + ベーン 90° (CASE4)

5) 単一開口 + 半ベーン (上側配置) + 半ベーン (下側配置) (CASE5)

6) 単一開口 + 半ベーン (上側配置) + 半ベーン (下側配置) (CASE6)

7) 単一開口 + ベーン 90° + 補助板 (CASE12)

8) 改良型窓 ① (CASE16)

9) 改良型窓 ② (順向き) (CASE17)

10) 改良型窓 ④ (CASE21)

11) 改良型窓 ⑥ (CASE25)

12) 単一開口 (壁厚 0.5mm)

13) 単一開口 (壁厚 4mm)

14) 単一開口 (壁厚 6mm)

15) 単一開口 (壁厚 8mm)

写真 2 可視化写真(全体) 1)~11)は全て壁厚 2mm

討する開口パターンの開き角度は全て 45 度とする。本ケースは CASE17 と同様に、外部空気はその流れ方向に順じて室内に導入される(写真 2-10 参照)が、壁面から離れた位置の風を利用可能であり、基準化換気量の値は 0.128 を示す。換気量の値は縦軸回転窓 90°の場合(CASE4)に接近し、且つ室内側に物理的な障害が生じない利点がある。

改良型窓④(CASE21)の長辺を 1 箇所折り曲げて先端側を壁面に平行とした場合の基準化換気量を改良型窓⑤に示す。折り曲げ位置が根元に近付くに従い、ペーンの見付け面積に対応して換気量は減少する(CASE22, 23)が、縦軸回転窓 45°(CASE3)と同程度以上の値を示す。

開口窓を 4 分割し、うち対角上の 2 枚を外開き、残りの 2 枚を内開きとした場合の基準化換気量を改良型窓⑥に示す。外部空気は CASE22, 23 と同様に室内に導入され(写真 2-11 参照)、換気量は大体、改良型窓⑤に対応する。縦軸回転窓の場合におけるペーンの室内側部分には、ペーンの風上側で取り込まれた空気がショートカットして流出することを低減する効果があると考えられるが(CASE4, 5 参照)、本ケースでは流入経路にあたる室内側ペーンの風下側斜面に沿って空気が取り込まれるため、ペーンによるショートカット低減の効果はあまり期待できないものと考えられる。

(CASE26~33)

縦軸回転窓の通風性能と、内側に開く部分により物理的にスペースが占有される範囲は、開き角度をパラメータとしたトレードオフの関係となる。そこで、開き角度に応じて回転軸の位置が移動可能となるような仮想的な縦軸回転窓を検討する(但し、正確には、回転軸の棒自身は固定、窓に組み込む軸受け位置がスライドする機構をモデル化している。)。通常の縦軸回転窓と同程度の換気性能を満たすことを目標としている。開き角度は 45°と 90°について検討を行う。

開き角度 45°の無次元換気量を改良型窓⑦に示す。外側と内側の比率が 5 : 3 (CASE26)では通常の縦軸回転窓(CASE3)とほぼ等しい換気性能となるが、外側部分の比率の上昇に従い段階的に換気量は減少する。室内側ペーンが減少することで流入空気の室内への誘引が難しくなると考えられる。

開き角度 90°(改良型窓⑦参照)では外側と内側の比率が 5 : 3(CASE30)時の換気量をピークとし、これ以降(CASE31, 32)では幾分低減するものの、縦軸回転窓 90°の換気量(CASE4)とほぼ等しくなる。開き角度 45°の場合と比べて上方空気の運動量が利用できるため換気量の低減が少ないと思われる。しかし、内側部分が全く無くなれば(CASE33)換気量は大きく低減し、ペーンサイズを上側半分のみとした CASE5 とほぼ同じ換気量となる。縦軸回転窓の原理における室内側の誘導ペーンの存在は、取込時における気流のショートカットを低減する為の要素といえる。

2. 6 換気量に関する検討例 (2 開口通風との比較)

風上側で流入、風下側で流出が生じる両側 2 開口通風と比較して、片側 1 開口通風でどの程度の換気量を得ることが可能であるか参考として検討する。建物上空風速を V_0 m/s、開口面積を両側 2 開口通風では風上、風下それぞれ A_0 m²、片側 1 開口通風では $2A_0$ m² として総開口面積を等しい条件とした。流量係数は 0.65、風圧係数は独立建物として風上側で 0.8、風下側で -0.4^{※6)} を仮定する。上記の仮定による両側 2 開口通風時の開口面通過風量は $0.50 A_0 V_0$ となる。

一方、風が開口面に対して平行に流れる場合、開口近傍風速は建物

隅角部からの距離によって異なるが、既往の文献^{※7)}中で、低層・横長の建物の壁面ほぼ中央に単一開口が位置する場合の近傍風速と上空風速の比について、風洞実験により検討した例がある。同条件を想定して文献より横風時の開口近傍風速 = $0.46 V_0$ m/s を仮定する。基準化換気量 k より換気量を算出すると単一開口(CASE1)は $0.022 A_0 V_0$ 、ペーン設置時(CASE4)は $0.144 A_0 V_0$ となる。非常に大胆な仮定に基づいた目安ではあるが、両側 2 開口時を基準とすればそれぞれ 4.4%、28.7%の程度の換気量が推算される。

3. 片側開口窓を対象とした室内循環流モデルの通風性状

3. 1 検討モデル

2. 1 節の一開口モデル内に、扇風機や天井扇、排気ファン等により生じるであろう室内気流を模擬した循環流を発生させる。片側開口窓より取り入れた新鮮空気を、人工的に与える循環気流に乗せて室内へと誘引させることを目的とし、換気量の増減について検討する。この点に関して筆者らは回転羽を用いた簡易的な実験を既に行っている^{※8)}。本報ではポンプによる気流の吹出・吸込を利用して、より一般的な室内気流の在り方としてのモデル化をした。検討モデルを図 4 に示す。

3. 2 実験条件

流れ場の設定は 2. 2 節にはば準ずる。平板上の風速分布を図 5 に示す。一様流代表風速 = 1.4m/s (開口を閉じた状態での、開口中央に相当する位置の上方、 $Z = 200$ における風速)、 Re 数 = 約 4,700 である(開口幅を代表長さとする)。

3. 3 測定概要

FID 及びトレーサ経路については 2. 3 節にはば準ずる。室内にトレーサガスを 100sccm で放出、同時に 100sccm でサンプルした。循環気流生成に供する吹出口と吸込口には内径 1mm のパイプを用い、ポンプにより空気を循環させる。それぞれ 8 点ずつを同一壁面上に設

点線枠内は風洞床面より下に埋設される

図4 循環流の作成 (左の図は負回転時)

図5 流入風の鉛直プロファイル

けている(図4参照)。循環流生成の為のポンプ流量は3.5slmとする。
図4において右回転を「正」、左回転を「負」と定義する。

3. 4 実験ケース

対象ケースは2節の開口モデルCASE1, 4, 17, 21をベースとした。
本節では順にCASE1~4と記載を置き換える。それぞれ循環流無、正の循環、負の循環について換気量測定を行なう。

3. 5 実験結果(表4参照)

通常の単一開口(CASE1)では負回転時に無次元換気量は増大する(0.014→0.027)。混合層中の空気が風上壁面側へと引き寄せられて換気量が増加すると考えられる。縦軸回転窓(CASE2)では負回転時に無次元換気量は増加する(0.138→0.180)が、もともとの室内気流が室奥までの換気に有効に利用されていると思われ、CASE1程には増加率は高くない。CASE3, 4では正・負回転ともに循環流の効果はあまり見られない。元々の室内気流が負回転であれば、取入空気を風上壁面側に引き寄せることで気流のショートカットを抑制する利点があると思われる。しかし、本ケースは元々の室内気流が正回転に沿うため(写真2-9, 2-10参照)、この流れに沿って正回転に循環流を作成すると、一旦取り入れた空気が循環流の影響で開口近傍に沿って流れ、逆に新鮮空气のショートカットによる流出を促すため換気量がさほど増加しない可能性もある。とりわけCASE4では正・負回転の両方で換気量が減少する。

4. 単一開口モデルにおける壁厚と換気量の関係

4. 1 検討モデル、実験条件、測定概要、実験ケース

一開口モデルの壁厚を段階的に変化させた場合の換気量の推移を見る。開口面の部品を除き検討モデルは2.1節に準ずる。実験条件、測定概要は2.2~2.3節に準ずる。実験ケースは0.5mm, 2mm, 4mm, 6mm, 8mmの5段階とした。

4. 2 実験結果(図6参照)

壁厚が増加するに従い換気量は減少傾向を示す。また、壁厚の増加に従い取入空気の流入角度は段々と斜め下から真下に寄る傾向が見られる(写真2-2, 2-12~2-15参照)。但し、壁厚6mmと8mmにおける換気量の変化は少ない。壁厚8mmにおいてはほぼ真下に気流が流入しており(写真2-15参照)、これ以上壁厚が増加しても取入空気の流入角度にはあまり影響しない段階にあると推測される。

単一開口換気の場合、平均的には開口面の風下側で流入、風上側で流出し得るが、瞬間的に捉えれば、開口面の風下端付近において流入も流出も生じていると思われる。壁厚0.5mm及び8mmモデルのそれぞれにおいて、流入と流出の瞬間を捉えた画像を写真3に示す。壁厚0.5mm時においては開口面の風上側付近から外部空気が引き込まれ、又、流出される様子が見られる(写真3-1, 3-2参照)。一方、壁厚8mm時においては、開口面の風下側において、流出(写真3-4参照)に比べて流入(写真3-3参照)が生ずる頻度が高く見られる。開口面のほとんど風下端のみで気流が真下に引き込まれ、混合層の発達はいちた見られないように思われる。

5. まとめ

① 横風時における1開口モデルの通風性状

・単一開口における横風時の基準化換気量は0.024、ペーン(縦軸回転窓)45°で0.074、ペーン90°では0.156となり、単一開口にペーン

表4 実験パターン

		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
平面図
立断面図
種別		単一開口 (基準形式)	単一開口 + ペーン 90° (縦軸回転窓)	改良型窓②	改良型窓④
基準化換気量	無	0.014	0.164	0.094	0.142
	正	0.011	0.138	0.098	0.128
	負	0.027	0.180	0.057	0.114

図6 壁厚の変化と基準化換気量の関係

写真3 可視化写真(開口近傍)
(レーザーライトシートは開口中心軸(C.L.軸)を通り、垂直平面状に照射)

を設置することにより、室内換気効率の増進が見られた。

・開口窓の設計に寄与する各種換気量データを得た。外開きとなる改良型窓④45°(CASE21)の基準化換気量は0.128を示し、ペーン(縦軸回転窓)45°と比較して大きな値を示す。また、回転軸の位置が移動する改良型窓⑦45°では、外側と内側の比率が5:3を超えると基準化換気量の低減が著しくなるが、90°の場合には外側と内側の比率が4:4から7:1迄は換気量の低減はほとんどない。

② 片側開口窓を対象とした室内循環流モデルの通風性状

・ペーン 90°に負回転で循環流を付与すると、基準化換気量は 0.014 から 0.027 に増加した。ペーンと循環流の相互作用によって新鮮空気の室深部まで誘引が可能となる。

・室内に元々生じている気流が小規模である程、循環流の効果は大きい。但し、CASE4 のように、ショートカットによって換気量が減少する場合もある。

③ 単一開口モデルにおける壁厚と換気量の関係

・開口壁面の厚さが増加するに従い、基準化換気量は減少傾向を示す。壁厚 0.5mm 時に対する壁厚 8mm 時の基準化換気量はおよそ 7 割程度となる。

本研究から得られた知見を基にして、換気量予測を従来の風圧係数差による手法ではなく、建物周辺の風性状から行なう手法に関して、今後検討する予定である。

謝辞

本研究は「片面開口居室における通風・換気性状の研究」として、国土交通省の「住宅・建築関連先端技術開発助成事業」の助成を得て行っている。また、本研究を行なうにあたり立山アルミ工業株式会社（現：三協立山アルミ株式会社）から多大なご協力を頂いた。関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

注

注 1) 外部気流は開口面において室内気流（静止流体）と接触する。この速度差が生じる境界域においては片方の速度からもう片方の速度へ変化する乱流混合層が形成される。乱流混合層中では流体の混合運動が激しく、外部風の運動量は室内部に輸送される。模式図^{1),2)}を図 7 に示す。

図 7 開口部で生じる混合層中の乱れ（乱流拡散）

注 2) 一開口換気においては、開口面を流入した新鮮空気が室の奥深くに到達せずに流出し、開口面付近の空気の交換にとどまる（流入気流がショートカットする）可能性が有り得る。そこで、「室平均空気齢」で室の実質的な換気性能を評価するという考えに基づけば、「（トレーサーガス）室内一様発生時の室平均濃度」を用いることで、室の実質的な換気性能を評価することが可能となる。これはトレーサーガスを室内一様発生させれば室の任意の点の濃度は、開口から流入した新鮮空気が（任意の点に）到達する平均距離と平均気流速度を反映した「局所空気齢」に相当する値を示すが故である。

注 3) 瞬時一様拡散（完全混合と記述されることも多い。）濃度から算出される換気量は開口面通過風量を示す。主に 2 開口通風の評価に際して用いられるが、室内で汚染質が発生する際、汚染源の位置によって室平均濃度は異なるが排気口濃度は一意に定まる、という趣旨で使用される。

注 4) トレーサーガス一様発生時の室平均濃度（一）
 = 室平均空気齢（s）
 × 単位時間・単位体積当りトレーサー発生量（ $\text{m}^3 / \text{s} \cdot \text{m}^3$ ）

注 5) Warren の実験手法は「（トレーサーガス）室内一様発生時の室平均濃度」であるが、「室平均空気齢」との関係について言及していない。尚、本論文の各研究項目は全て Warren が検討していない内容について着眼したものである。

注 6) 既報^{4),5)}には「換気量：Q」とあるが、本報では「（実質的な）換気量： Q_e 」の表記に変更した。表記のみ異なるが定義は等しい。

記号表

z	: 開口中央を原点とした高さ (mm)
U_z	: 開口が閉じた状態で開口中央上方高さ z の風速 (m/s)
U_L	: 開口近傍の風速（代表風速とする） 本論文の中では開口が閉じた状態で、開口中央上方高さ 200mm の風速 (m/s) とする
k	: 基準化換気量 (-)
A	: 総開口面積 (m^2)
Q_e	: (実質的な) 換気量 (m^3/s)
U_L	: 開口近傍の風速 ($Z=200$ の風速) (m/s)
A_0	: 2 開口居室の窓 1 枚の開口面積 (m^2)
V_0	: 建物上空風速 (m/s)
L	: 建物模型の室内幅 (mm)
W	: 建物模型の開口幅 (mm)

参考文献

- 1) P.R. Warren & L.M. Parkins : Single-sided ventilation through open window, ASHRAE SP49, pp.209~228, 1985
- 2) P.R. Warren : Ventilation through openings on one wall only, Energy conservation in heating, cooling, and ventilating buildings, Heat and mass transfer techniques and alternatives, pp.189~206, 1978
- 3) 山中俊夫, 植崎正也ら : 単一開口を持つ室の風力換気に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 No. 517, pp.37~43, 1999.3
- 4) 河野良坪, 加藤信介ら : 片側開口建物の通風性状に関する研究（その 1）一様流中における片側開口建物の換気性状に関する風洞実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）環境工学Ⅱ No. 41392, pp.813~814, 2005.9
- 5) 河野良坪, 加藤信介ら : 片側開口建物の横風時における換気性状に関する風洞実験, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（札幌）No. E-25, pp.1069~1072, 2005.8
- 6) 石原正雄著 : 建築換気設計, 朝倉書店, pp. 86, 1969.3

（2006年 4 月 10 日原稿受理, 2006年 9 月 25 日採用決定）