

## 流出開口部への局所相似モデルの適用に関する検討

通風時の換気量予測法に関する研究 (第3報)

INVESTIGATION ON THE APPLICATION OF LOCAL DYNAMIC SIMILARITY MODEL  
TO OUTFLOW OPENINGS

Prediction accuracy of flow rate of cross-ventilated buildings (Part 3)

後藤伴延\*<sup>1</sup>, 大場正昭\*<sup>2</sup>, 倉渕 隆\*<sup>3</sup>, 遠藤智行\*<sup>4</sup>赤嶺嘉彦\*<sup>5</sup>, 野中俊宏\*<sup>6</sup>, 塚本健二\*<sup>7</sup>*Tomonobu GOTO, Masaaki OHBA, Takashi KURABUCHI,  
Tomoyuki ENDO, Yoshihiko AKAMINE, Toshihiro NONAKA  
and Kenji TSUKAMOTO*

Variation of discharge coefficients with wind direction and opening position is one of the main factors decreasing accuracy of cross-ventilation flow rate prediction. The local dynamic similarity model was developed to solve this problem, and previous papers had validated it for inflow openings. In the present study, two experiments and a CFD analysis were carried out to investigate its validity for outflow openings. The study showed that discharge coefficient was not always determined uniquely by the dimensionless room pressure  $P_R^*$ , and there were two types of relationship between discharge coefficient and  $P_R^*$ . The difference of the relationship was attributed to the thickness of external airflow layer, which passed tangentially to the opening. Therefore discharge coefficient could be predicted from  $P_R^*$  if either type of relationship was appropriately adopted according to the thickness of external airflow layer in each case. In addition, this study also showed the definition of dynamic pressure tangential to outflow openings, which is necessary to determine the  $P_R^*$ . It can be concluded from the study that the local dynamic similarity model is valid for outflow openings as well as inflow openings.

**Keywords :** Cross-Ventilation, Local Dynamic Similarity, Discharge Coefficient, Wind Tunnel Experiment, CFD

通風, 力学的局所相似, 流量係数, 風洞実験, CFD

## 1. はじめに

従来, 換気回路網計算による通風量予測の精度を低下させる要因として, 風上開口を通過した気流が消散せず動圧が残存したまま風下開口まで到達すること<sup>1,2)</sup>, 風圧係数と通風量の関係を決定する流量係数が外部風向や開口位置によって変化すること<sup>3,4)</sup>, などが指摘されている。

このうち, 流量係数が外部風向や開口位置によって変化する問題に対し, 第1報<sup>5)</sup>では, 開口部周辺気流の力学的相似性に基づいて「通風局所相似モデル」を提案し, このモデルによって流量係数の変化が説明できることを明らかにするとともに, 換気駆動力と接線方向動圧の比である無次元室内圧  $P_R^*$ によって流量係数が一意に決定されることを明らかにした。また, 第2報<sup>6)</sup>では, 通風局所相似モデルの適用に影響を及ぼすと考えられる幾つかの条件について検討を行い, 本モデルの適用範囲を明らかにした。

ただし, 第1報<sup>5)</sup>および第2報<sup>6)</sup>においては, 流入開口部のみを対象としており, 流出開口部を対象とした検討は行っていない。流出開口部においても流量係数が変化することは, 既往研究で明らか

かにされており, 接近流の風向や風速の影響<sup>3)</sup>, 開口部近傍の外部気流の風速や分布性状の影響<sup>4)</sup>が指摘されている。しかし, そのメカニズムは十分に解明されておらず, 変化する流量係数を広範に予測できる方法も存在していなかった。局所相似モデルは, 当初より流入開口部のみならず, 流出開口部の流量係数変化をも説明し得ることを期待して提案されたものである<sup>7)</sup>ことから, 本報では局所相似モデルを流出開口部に適用することの妥当性について検討した。

## 2. 局所相似モデル

図1に流入開口部および流出開口部周辺における気流の力学的性状を示す。局所相似モデルでは, 開口部周辺の圧力場を図1のように開口部法線方向動圧  $P_n$ , 開口部接線方向動圧  $P_t$ , 換気駆動力  $P_r$ の3つの圧力によって代表させ,  $P_t$ と  $P_r$ が決まれば通風量に直接関連する  $P_n$ が一意に決定される関係にあり, なおかつ,  $P_t$ と  $P_r$ の比が等しい条件間では3つの圧力の関係に力学的な相似性が成り立つものとする。表1に示すように, 流量係数  $\alpha$ と流入角・流出角  $\beta$ は, それぞれ  $P_t$ と  $P_n$ の比および  $P_n$ と  $P_r$ の比に相当するため, 本モデル

\*<sup>1</sup> 山口大学大学院理工学研究科感性デザイン工学専攻  
講師・博士(工学)\*<sup>2</sup> 東京工芸大学工学部建築学科 教授・工博\*<sup>3</sup> 東京理科大学工学部建築学科 教授・博士(工学)\*<sup>4</sup> 関東学院大学工学部建築学科 准教授・博士(工学)\*<sup>5</sup> 独立行政法人建築研究所 研究員・博士(工学)\*<sup>6</sup> (株)LIXIL 博士(工学)\*<sup>7</sup> 東京工芸大学 GCOE 研究員・博士(工学)

Lecturer, Yamaguchi University, Dr. Eng.

Prof., Tokyo Polytechnic University, Dr. Eng.

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

Assoc. Prof., Kanto Gakuin University, Dr. Eng.

Researcher, Building Research Institute, Dr. Eng.

LIXIL Corporation, Dr. Eng.

GCOE Researcher, Tokyo Polytechnic University, Dr. Eng.

の考え方に従えば、これらは  $P_t$  と  $P_r$  の比から一意に決定できることになる。そして、この  $P_t$  と  $P_r$  の比を無次元室内圧  $P_{R^*}$  と定義する。

ここで、流出開口部の基礎式は流入開口部と同様に定義されるが、流出開口部の  $P_t$  は屋外側の開口部近傍の接線方向動圧とし、 $P_t$  と同じ位置で定義される静圧  $P_s$  は風圧  $P_w$  に等しいものと仮定する。また、流入開口部における  $P_{R^*}$  が常に負であったのに対し、流出開口部における  $P_{R^*}$  は常に正となる。

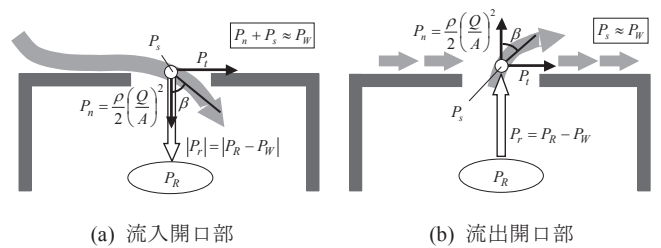


図1 開口部周辺における気流の力学的性状

### 3. 流出開口部に対する局所相似モデルの適用可能性と流出開口部周辺の力学的性状に関する風洞実験(実験①)

局所相似モデルの流出開口部への適用可能性と、通風時の流出開口部周辺の力学的性状を明らかにするため、流出開口部周辺の通風現象のみを模擬した風洞実験を実施した。

#### 3.1 実験方法

実験は東京工芸大学所有のエッフェル型風洞（風洞断面：W1200mm×H1000mm）において行った。実験装置を図2に、実験概要を図3に示す。本装置の直方体のチャンパー部分は、内部が多孔パネルで2室に仕切られており、そのうち一方の室に流出開口部が設けられている。もう一方の室の底面にはダクトが接続され、送風機により流量が段階的にコントロールされながら空気が吹き込まれる。2室間の多孔パネルは、ダクトからの吹出し気流を拡散させ、室内動圧による流量係数への影響を取り除くために設置されている。また、このチャンパーの室外には、室内床面と同じ高さで円形の平板が固定され、開口部周辺の室内床面および円形平板上において圧力測定が可能となっている。なお、流出開口部はこの面と接するように位置する。アプローチフローは風速 7m/s の一様流とし（図4）、風洞床面の摩擦による境界層の影響を排除するため、本装置を風洞床面から高さ 250mm の位置に支持した。

実験条件を図5に示す。風向角を 45° から 135° まで 22.5° 刻みで5段階に変化させた条件と、風向角 90° で風上側に袖壁を付けた条件の計6条件を設定した。条件の中には風圧が正になる風向角もあるが、開口部が建物の風上コーナーを挟んで両側に存在する場合や、屋根面と風上側壁面の両方に開口部が存在する場合など、圧力のバランスによっては風圧が正であっても流出側になり得ることから、これらの風向角も条件に含めた。本実験における測定項目と測定方法は以下の通りである。

室圧 ( $P_R$ )：流出開口部のある室の天井面に均等配置された圧力測定孔（9点）で測定された圧力の平均値を室圧とする。

風圧 ( $P_w$ )：流出開口部を開き、ダクトからの空気の入出りを無くした状態での室圧を開口位置での風圧とする。

通風量 ( $Q$ )：模型に接続されたダクトの途中に設置されたサーマルフローメーターによって測定する。

風速 ( $U_i, U_j, U_k$ )：開口部周辺の風速を、図2に示す座標  $i, j, k$  の各成分について、それぞれスプリット・フィルム型風速計 (Split Film Probe: SFP) により測定する。

静圧 ( $P_s$ )：開口部周辺の室内床面および円形平板上の圧力を、図2に示す位置に配置された圧力測定孔（231点）で測定する。

流量係数  $\alpha$  は表1の式(2)に従い、室圧、風圧、通風量の測定値より算出した。また、実験前に無風条件下での流量係数（以降、基本流量係数  $\alpha_s$  と呼ぶ）を調べたところ 0.66 であった。また、接線方

表1 局所相似モデルの基礎式

$P_r = P_R - P_w \quad \dots(1)$	$Q = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho}  P_r } \quad \dots(2)$
$\alpha = \sqrt{\frac{P_n}{P_t}} \quad \dots(3)$	$\beta = \tan^{-1} \sqrt{\frac{P_t}{P_n}} \quad \dots(4)$
	$P_{R^*} = \frac{P_r}{P_t} \quad \dots(5)$

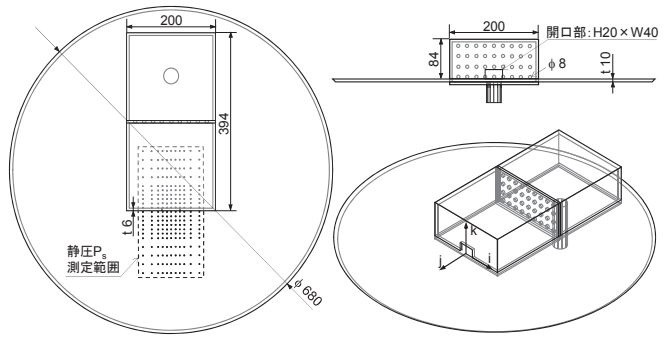


図2 実験装置 (単位: mm)

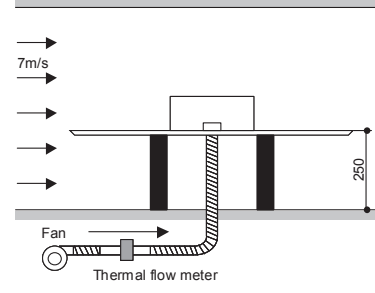


図3 実験①の概要

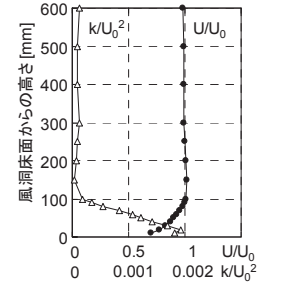


図4 アプローチフロー (実験①)

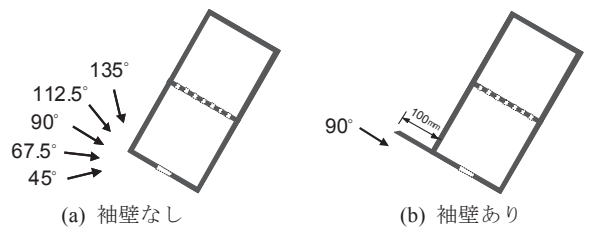


図5 実験条件

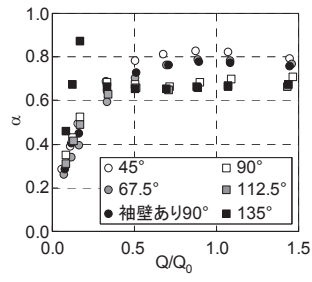


図6 通風量と  $\alpha$  の関係

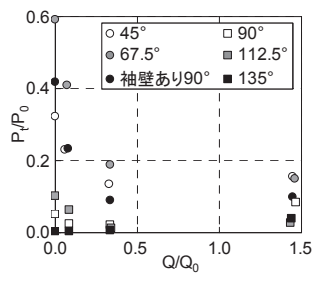


図7 通風量と  $P_t$  の関係

向動圧  $P_t$  については、開口部に最も近い位置（開口部外端から 5mm 離れた位置）で測定された風速のうち、開口面に対して平行な成分 ( $U_i, U_k$ ) を動圧換算し、開口面上 9 点の値を平均することにより求めた。

### 3.2 実験結果

流量係数  $\alpha$  と接線方向動圧  $P_t$  の結果を図 6, 7 にそれぞれ示す。図の横軸は基準化した通風量である。図 6 より、どの風向角条件においても、 $\alpha$  は通風量が小さいときに低下し、大きくなるにつれて上昇する傾向がみられる。特に、風向角 45°, 67.5°, 袖壁あり 90° 条件では、通風量が大きいときには  $\alpha$  が基本流量係数  $\alpha_s$  を超えて上昇している。また、図 7 より、 $P_t$  は通風量によって変化し、基本的にどの風向角条件においても通風量が増加するほど  $P_t$  は 0 に近づく傾向がみられる<sup>注1)</sup>。このことは、流入開口部において  $P_t$  が通風量に依らず概ね一定の値であったことと大きく異なるが、流入開口部では、開口部より上流側で  $P_t$  が定義されるために、開口部通過気流が  $P_t$  に影響を及ぼさないのに対して、流出開口部では、開口部より下流側で  $P_t$  が定義されているため、開口部通過気流が  $P_t$  に影響を及ぼしたものと考えられる。ただし、この  $P_t$  の低下は、通風気流との衝突により静圧転換が生じたためであり、 $P_t$  が低下していても、通風気流の妨害に作用する力が減じたことを意味しないと推測されることから、局所相似モデルを流出開口部に適用する際には、無通風時の接線方向動圧を  $P_t$  とすることが適切と考えられる<sup>注2)</sup>。また、通風気流の妨害要素が、開口部上流側と開口部下流側空間との接線方向風速差（相対風速）、即ち、室内外の接線方向動圧差であると考えられるならば、流出開口部におけるこのような  $P_t$  の与え方は、流入開口部における  $P_t$  の与え方と本質的に違いは無いものと考えられる。

上述の通り、無通風時の接線方向動圧を  $P_t$  として  $P_R^*$  を算出し、 $P_R^*$  と  $\alpha$  の関係を風向角条件ごとにまとめたものを図 8 に示す。この図より、 $P_R^*$  と  $\alpha$  の関係は予想に反して一意ではなく、二種類に分かれることが見て取れる。そのうち一方の傾向を持つ風向角 45°, 67.5°, 袖壁あり 90° 条件では、 $\alpha$  は  $P_R^*=2$  付近までの間に急激に上昇し、 $\alpha_s$  より大きい値で一定となる。もう一方の傾向を持つ風向角 90°, 112.5° 条件では、 $\alpha$  は  $P_R^*=5$  付近まで緩やかに上昇した後、 $\alpha_s$  とほぼ同じ値で一定となる。前者の条件群と比較して、後者の条件群のみが持つ特徴としては、アプローチフローが開口部から見て風上側のチャンパー隅角部で剥離し、開口部を越えた位置で再付着した後開口部へ向かって逆流しており、 $P_t$  はこの逆流によるものであることが指摘出来る。なお、特異な傾向を示している 135° 条件については、開口部から見て風上側のチャンパー隅角部で剥離した外部気流が、流出開口部の位置で再付着する条件であった。従って、 $P_R^*$  の定義式の分母にあたる  $P_t$  がほぼ 0 となるため（図 7）、僅かな  $P_t$  の測定誤差であっても  $P_R^*$  の同定精度に大きく影響することや、開口面内に逆向きの接線方向気流が同時に存在する複雑な流れ場であったことが、この特異な結果の原因として考えられる。

図 9 と図 10 に、開口部周辺で測定された床面静圧および風速ベクトルのうち、特徴の異なる 2 つの風向角 67.5° と 112.5° の結果を示す。風速ベクトル分布をみると、どちらの風向角条件においても、 $\alpha$  が小さい場合ほど流出気流の流路が狭くなっていることが分かる。 $\alpha$  の低下は、このような流路の縮小が主たる原因と考えられ、流路の縮小が外部風によって生じていることは明白であるから、 $\alpha$  の変化

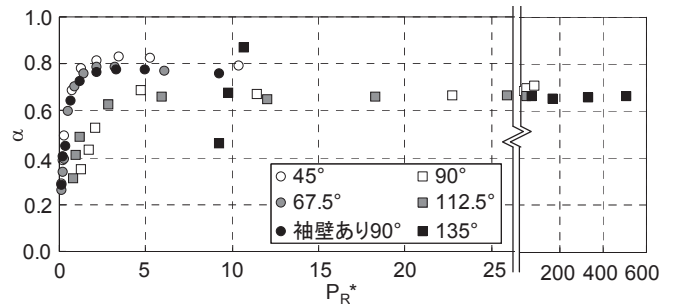


図 8  $P_R^*$  と  $\alpha$  の関係（実験①）

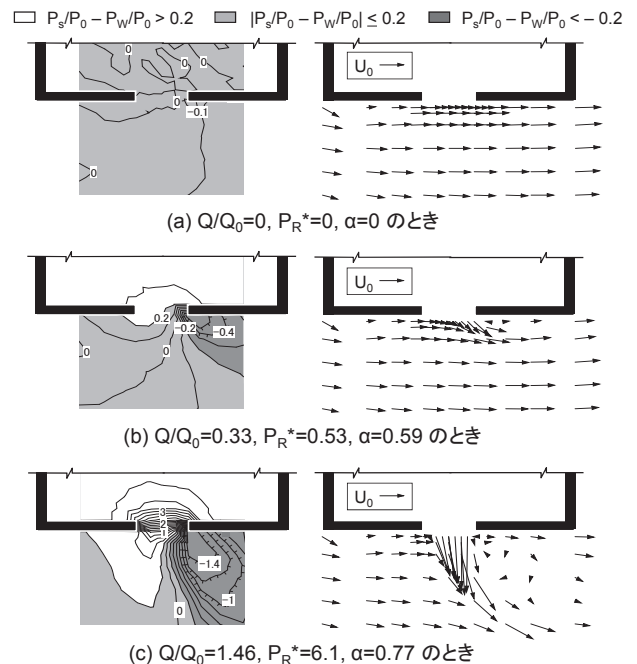


図 9 風向角 67.5° 条件における開口部周辺の床面静圧係数 ( $P_s/P_0$ ) と風速ベクトル

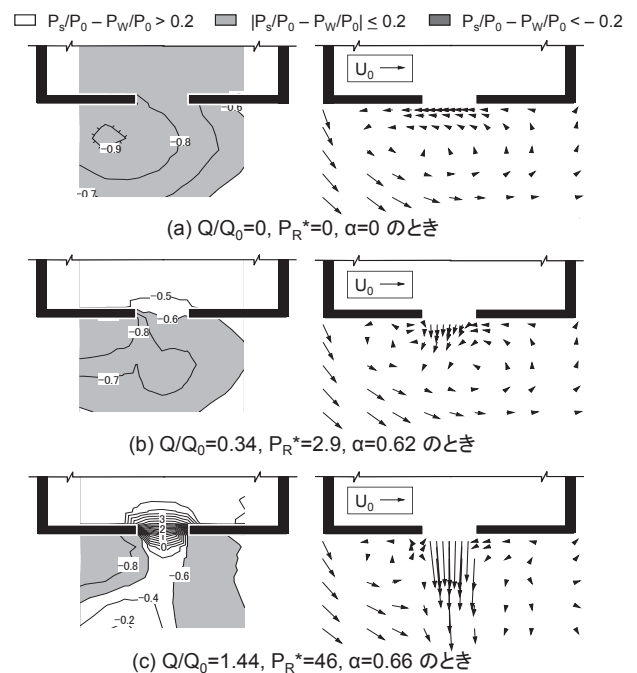


図 10 風向角 112.5° 条件における開口部周辺の床面静圧係数 ( $P_s/P_0$ ) と風速ベクトル

を局所相似モデルによって説明することは合理的と考えられる。また、床面静圧分布をみると、特に風向角  $67.5^\circ$ において、壁面を沿う外部気流が流出気流と衝突する場所での静圧上昇が明確にみられることから、 $P_t$ の低下は静圧転換が生じたためであるという上記の推測が裏付けられた。さらに、風向角  $67.5^\circ$ の床面静圧分布をみると、静圧上昇部分と反対側の開口部風下端に、大きな圧力低下が生じていることが分かる。この原因については後の5章で検討するが、風速ベクトルと見比べたとき、流出気流の流路が概ねこの負圧の領域上にあることから、流路内の静圧は風圧  $P_w$ より大きく低下していたことが推測される。このことは、実際の換気駆動力  $P_R - P_s$ が仮定上の換気駆動力  $P_R - P_w$ よりも大きかったことを意味するから、これによって通風時の流量係数が  $\alpha_s$ を越えて増加していたことが説明できる。一方、図10の風向角  $112.5^\circ$ 条件では、流出気流の流路内の静圧は  $P_w$ から大きく変化していないが、この原因についても後の5章で検討することとする。なお、以上のような現象は、それぞれの条件群の他の風向角条件においても同様であった。

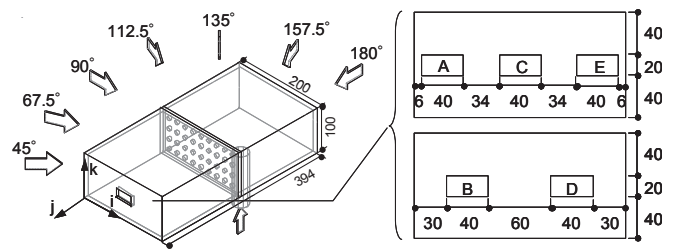


図11 実験②の概要 (単位: mm)

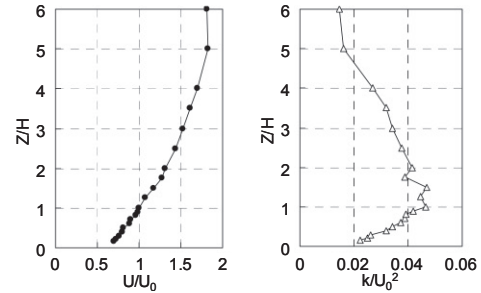


図12 アプローチフロー (実験②)

#### 4. 境界層流を用いた風洞実験(実験②)

前章の実験から、流出開口部では流量係数  $\alpha$ が  $P_R^*$ によって必ずしも一意に決定されるわけではないが、風向角条件を二群に分けることにより、 $\alpha$ が  $P_R^*$ によって予測できる可能性、即ち、局所相似モデルを適用できる可能性が明らかになった。そこで、より実際に近い条件での適用性を明らかにするため、境界層流を用いた実験を行った。

##### 4.1 実験方法

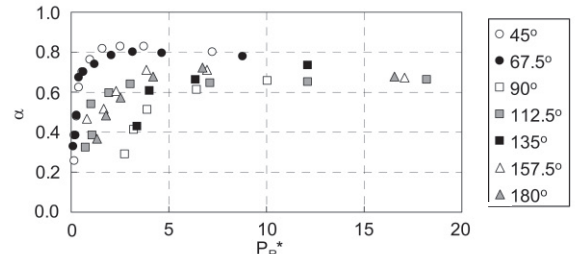
実験は前章と同じ風洞において、前章と同一の実験装置を用いて実施した。ただし、実験装置は円形平板を取り外し、風洞床面に設置した。実験条件として、図11のように風向角を  $45^\circ$ から  $180^\circ$ まで  $22.5^\circ$ 刻みで7段階に変化させ、さらに、開口部位置を5通りに変化させた。アプローチフローは図12に示すように鉛直風速分布が1/4乗則に従う乱流境界層とし、実験装置の高さ(100mm)での風速を基準風速として  $7\text{m/s}$ に設定した。

測定項目は  $P_R, P_w, Q, U_i, U_j, U_k$ とし、前章と同様の方法で測定を行った。また、 $P_t$ についても前章と同様に定義した。なお、実験前に開口部の基本流量係数  $\alpha_s$ を調べたところ  $0.68$ であった。

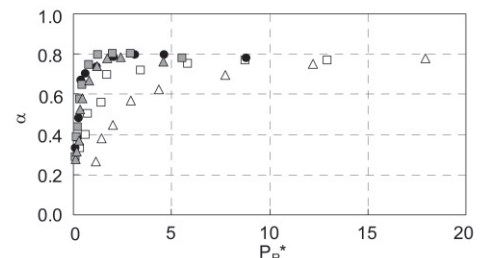
##### 4.2 実験結果

壁面中央に開口部を設けた条件において得られた、 $P_R^*$ と  $\alpha$ の関係を図13(a)に示す。この図より、 $P_R^*$ と  $\alpha$ の関係は、境界層流中であっても前章と同様であることが分かる。ただし、風向角  $90^\circ$ と  $135^\circ$ では、図14(b)(d)に示すように、剥離流の再付着点が開口面内もしくは非常に近い位置にあるため、主たる二種類の傾向から外れた結果となっている。

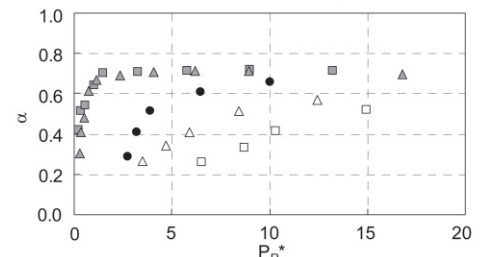
図13(b)(c)(d)に、風向角  $67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ$ 条件における、異なる開口部位置での  $P_R^*$ と  $\alpha$ の関係をまとめて示す。これらの図より、一部の例外を除き、大部分の  $P_R^*$ と  $\alpha$ の関係は前述の二種類の傾向のどちらかに区別できることが分かる。また、例外である  $67.5^\circ$ と  $90^\circ$ の開口位置A、 $90^\circ$ における開口位置BとCについては、図14(a)(b)に示すように、外部気流の剥離点が開口部の非常に近い位置にあったり、再付着点が開口面内にあたりることが影響したものと考えられる。



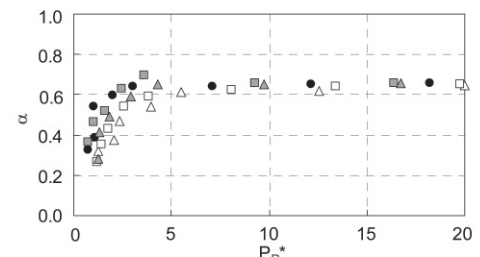
(a) 開口部位置C条件



(b) 風向角  $67.5^\circ$ 条件



(c) 風向角  $90^\circ$ 条件



(d) 風向角  $112.5^\circ$ 条件

図13  $P_R^*$ と  $\alpha$ の関係 (実験②)

### 5. CFD 解析による流量係数変化のメカニズムと $P_1$ 定義位置の検討

前章までの実験結果より、局所相似モデルは流出開口部にも適用可能と考えられる。ただし、外部気流が剥離した後に逆流して開口部へ到達する場合とそうでない場合とでは、流量係数の変化傾向が異なっており、これが開口部風下端の静圧変化の差異に起因していると考えられることから、このような静圧変化の差異が生じるメカニズムについて、CFD 解析により検討を行った。さらに、前章までは、接線方向動圧  $P_1$  を開口部外端から 5mm 離れた位置の風速測定値から求めており、それによる大きな問題は生じていなかった。しかしながら、その位置で定義し得る根拠は不明なままであるため、同時に  $P_1$  の定義位置についても CFD 解析により検討を行った。

#### 5.1 解析方法

外部気流が剥離した後に逆流して開口部へ到達する場合と、そうでない場合とを比較した時、主たる相違点として開口面に対する法線方向の外部気流分布が指摘できる。そこで、解析モデルとして 4 つの Case を図 15 のように設定した。これらのモデルでは、外部気流分布が異なるように、室外領域流入面の位置と大きさを変化させている。なお、Case 1 は図 14(a) のように外部気流が壁面に沿って流れる場合、Case 2 は図 14(b) のように外部気流が剥離等によって減衰した後に壁面に沿って流れる場合、Case 3 と 4 は図 14(c)(d) のように外部気流が剥離した後に逆流して開口部へ到達する場合等に対応する。また、開口部は実験と同じサイズとした。

解析には汎用ソフト STREAM Ver.8 (ソフトウェアクレイドル社) を用いた。解析条件を表 2 に示す。室外領域の流入面には、x 方向に外部気流を想定した 2m/s の風速を与え、室内領域の流入面には、y 方向に通風気流を想定した 9 段階の風速を与えた。解析モデルを代表して、Case 1 のメッシュ分割を図 16 に示す。室内領域 (開口部含む) の壁面および室外領域の開口部のある面をノースリップとし、乱流モデルには低 Re 数型  $k-\epsilon$  モデルを用いた<sup>注3)</sup>。

開口部の無い状態で外部気流を計算したところ、開口部中心位置での風速プロファイルは図 17 の通りであった。また、外部気流の無い状態で計算した流量係数 (基本流量係数  $\alpha_s$ ) は 0.71 であった。

#### 5.2 解析結果

図 18 に解析結果より得られた Case 毎の  $P_R^*$  と  $\alpha$  の関係を示す。このとき  $P_R^*$  は、開口部外端から 5mm 離れた位置の  $P_1$  を用いて求めている。この図より、Case 1 と 2 については、実験での外部気流が順方向に流れる場合と傾向が良く一致していることが分かる。ただし、解析では実験よりも広範囲の  $P_R^*$  が出現しているが、 $P_R^*$  が実験範囲を超えて充分に大きくなると、 $\alpha$  が  $\alpha_s$  に近似していく様子がみられる。一方、Case 3 については、 $\alpha$  の変化が Case 1 や 2 よりも緩やかであり、実験における外部気流が逆流する場合の傾向が概ね再現されていることが分かる。そして、Case 4 については、外部気流が逆流する場合と順方向に流れる場合の中間の傾向にある様子が見て取れる。

Case 1 と 3 について、開口部周辺の圧力と風速の解析結果の一部を図 19, 20 に示す。Case 1 と 3 の圧力分布をみると、流出気流が小さい時には両 Case とも開口部風下端に負圧が発生しているが、Case 1 では流出気流の増大とともに負圧が大きくなるのに対して、Case 3 では流出気流が大きくなると負圧が消失している。この負圧が発生・消失するメカニズムについては、図 21 に示す Case 3 の流線図

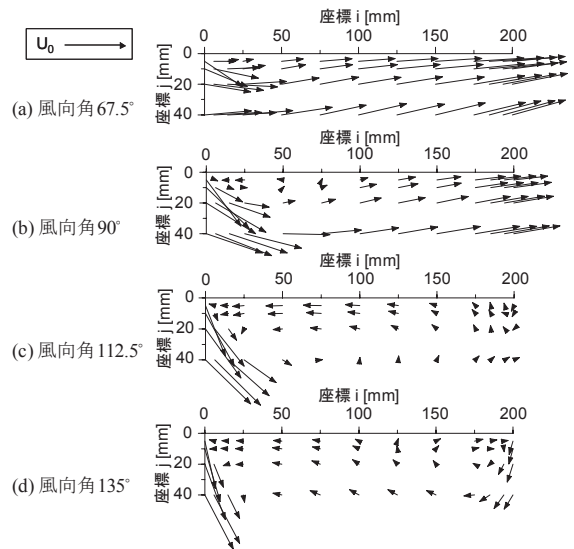


図 14 開口部中心高さにおける室外の風速ベクトル

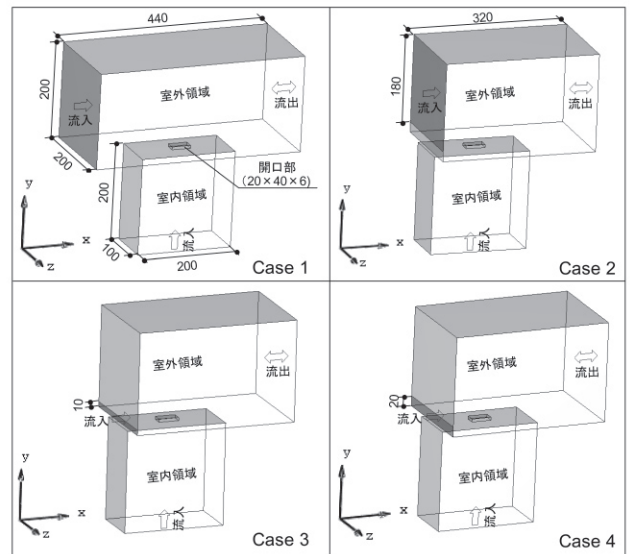


図 15 CFD 解析モデル (単位: mm)

表 2 CFD 解析条件

境界条件	室外領域	[流入面] x 方向風速 $U=2$ [m/s], $k=U^2/100$ , $\epsilon=0.09^{0.75}k^{1.5}/0.07D_e$ ( $D_e$ : 等価直径=0.20 (Case 1), 0.19 (Case 2), 0.019 (Case 3), 0.036 (Case 4) [m])
	室内領域	[流入面] y 方向風速 $V=0, 0.01, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15, 0.5$ [m/s], $k=V^2/100$ , $\epsilon=0.09^{0.75}k^{1.5}/0.07D_e$ ( $D_e$ : 等価直径=0.13 [m]) [壁面] ノースリップ
乱流モデル	低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデル	
移流項離散スキーム	QUICK	

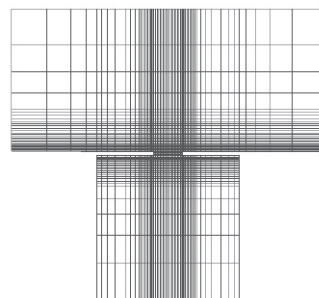


図 16 メッシュ分割 (64×58×49)

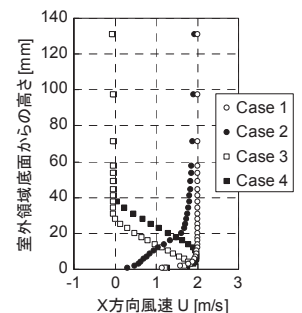


図 17 開口部中心位置上での風速プロファイル

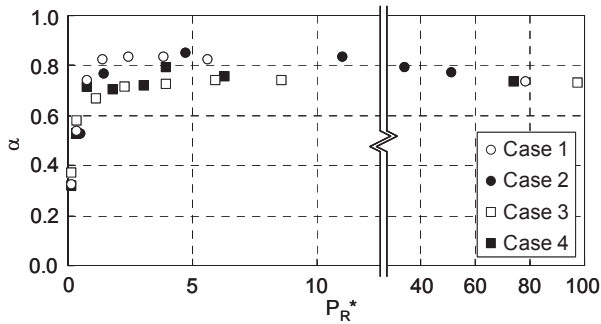


図 18  $P_R^*$ と $\alpha$ の関係 (CFD 解析)

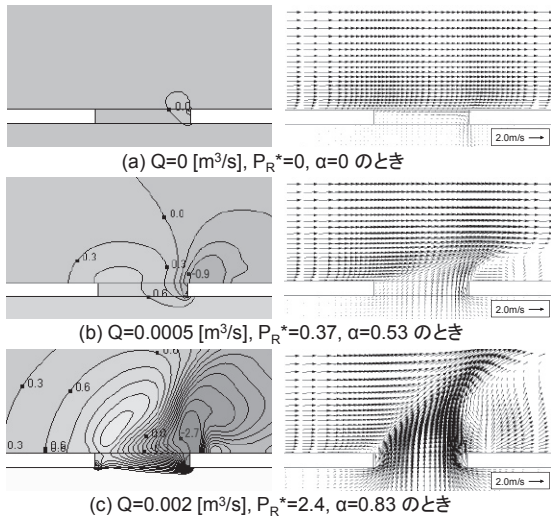


図 19 Case 1 における開口部周辺の静圧[Pa]と風速ベクトル

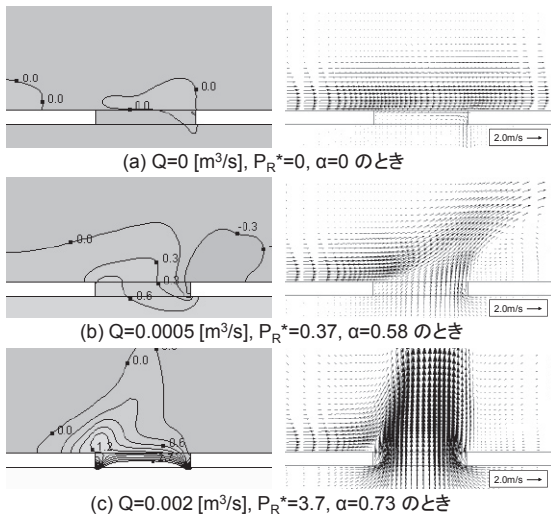


図 20 Case 3 における開口部周辺の静圧[Pa]と風速ベクトル

により説明できる。負圧が発生するのは、壁面を沿う外部気流が開口部風上端で流出気流と衝突し、剥離流が形成されるためである。一方、負圧が消失する理由は、流出気流が充分大きくなると、外部気流の層が破られて、層の外側から開口部風下端へと圧力が供給されるようになるためである。

流出気流の流線および流線上の圧力より算出した、流出気流の重心位置と平均圧力<sup>注4)</sup>の軌跡について、Case 1 および Case 3 の結果の一例を無風条件 (基本流量係数  $\alpha_S$  の計算条件) での結果と比較し

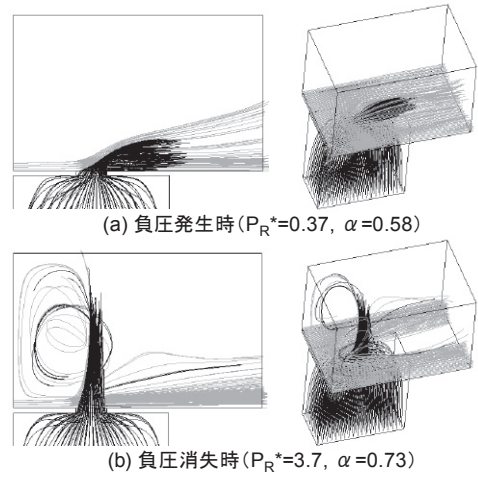


図 21 Case 3 の流線図

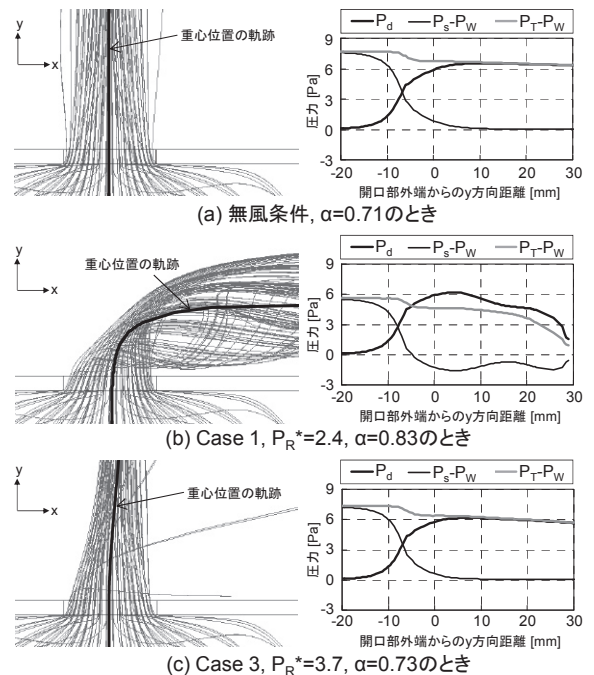


図 22 流出気流の重心位置と平均圧力

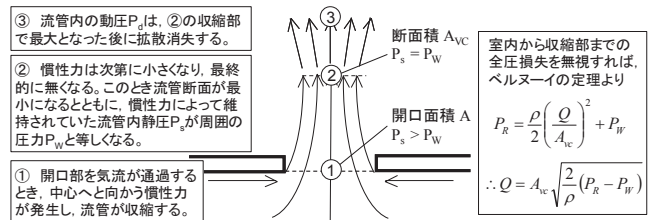


図 23 流量係数と流管の収縮の関係

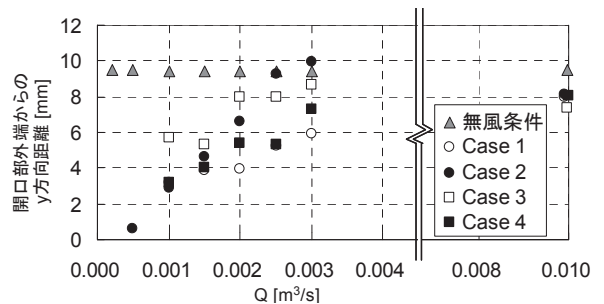


図 24 流管収縮部の位置

て図 22 に示す。図中の  $P_d$  は流出気流の平均動圧を表しており、平均静圧  $P_s$  および平均全圧  $P_T$  は風圧  $P_w$  との差で表している。無風条件と Case 1 とを比較すると、無風条件では開口部通過直後の  $P_s$  が  $P_w$  と一致するのに対して、Case 1 の  $\alpha > \alpha_s$  となるときには、開口部通過時および通過直後の  $P_s$  が  $P_w$  より小さくなっていることが分かる。これは、 $\alpha > \alpha_s$  となる原因が流路内の静圧が風圧よりも低下することにあるという、3 章での推測と一致する。

ところで、流量係数が流管の収縮によって決まることは、既往文献<sup>1,8)</sup>でも述べられている。その関係は図 23 のように説明され、室内から流管断面が最小になる位置（以降、収縮部と呼ぶ）までの全圧損失を無視すれば、流量係数  $\alpha$  は開口部面積  $A$  に対する  $A_{vc}$  の比であることが分かる。なお、図 23 は外部気流の無い場合についての模式図であるが、外部気流がある場合においては、 $A_{vc}$  がさらに狭められることにより  $\alpha$  が低下していると考えられるから、この収縮部の位置を見れば、主にどの位置までの接続方向気流が  $\alpha$  に影響を及ぼしているかが判定できると考えられる。

そこで、 $P_d$  が極大となる所を収縮部とみなして<sup>注5)</sup>その位置を求め、得られた結果を図 24 に示す。ただし、収縮部が明確に判別できない場合もあり、その結果は除外してある。この結果より、通風気流  $Q$  が大きくなる程、つまり  $\alpha$  が  $\alpha_s$  に近づく程、収縮部の高さ（開口部外端からの  $y$  方向距離）が無風条件のときのそれに近づく様子が見て取れる。従って、 $\alpha$  が変化するのには収縮部が概ね無風条件の収縮部高さ以下であるときであるから、 $\alpha$  に影響を及ぼすのは主にこの高さ以下の接続方向気流であると考えられる。

以上より、局所相似モデルを流出開口部に適用する際の  $P_t$  の定義としては、無風条件時の収縮部高さ以下の平均値とすることが適切と考えられ、今回の 40mm×20mm の開口部の場合には、その高さが約 10mm となる<sup>注6)</sup>。ここで、図 18 のデータについて、接続方向動圧  $P_t$  を 0~10mm の平均値として  $P_{R^*}$  を求め直したものを図 25 に示す。この図をみると、図 18 との大きな違いはみられない。その理由としては、 $P_t$  が 5mm の位置で定義されていたことにより、期せずして 0~10mm の平均的な  $P_t$  が得られていたためと考えられる。

## 6. 結語

本報では、局所相似モデルを流出開口部に適用することの妥当性に関して、実験と CFD 解析により検討を行った。その結果として得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 流出開口部では、流量係数  $\alpha$  が無次元室内圧  $P_{R^*}$  によって必ずしも一意に決定されず、 $P_{R^*}$  と  $\alpha$  の関係には二種類の傾向が存在する。
- (2)  $P_{R^*}$  と  $\alpha$  の関係における二種類の傾向の違いは、開口面上を流れる外部気流の層の厚さに起因している。
- (3) 外部気流の分布を考慮して場合分けをすることにより、 $\alpha$  を  $P_{R^*}$  によって予測することは可能である。即ち、流出開口部に局所相似モデルを適用することは可能である。
- (4) 流出開口部について  $P_{R^*}$  を求める際の接続方向動圧  $P_t$  は、無風条件の収縮部位置から開口部までの間の平均接続方向動圧とすることが適切である。

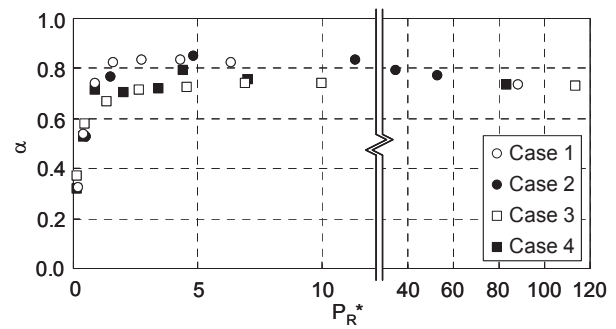


図 25  $P_t$  定義位置の変更後の  $P_{R^*}$  と  $\alpha$  の関係 (CFD 解析)

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、当時東京工芸大学の学生であった石田三裕氏と下地恒英氏、山口大学の学生であった田村奏子氏と武村沙耶氏にご尽力いただきました。また、本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム (平成 20 年度~24 年度: 東京工芸大学「風工学・教育研究のニューフロンティア」、拠点リーダー: 田村幸雄) および日本学術振興会・科学研究費補助金 (基盤研究(B)18360278, 研究代表者: 大場正昭) の補助のもとで行われた。

## 記号

$A$	開口面積	[ $m^2$ ]
$A_{vc}$	流管収縮部の断面積	[ $m^2$ ]
$H$	模型高さ	[ $m$ ]
$k$	乱流エネルギー	[ $m^2/s^2$ ]
$P_d$	動圧	[ $Pa$ ]
$P_n$	開口部法線方向動圧	[ $Pa$ ]
$P_0$	基準動圧 ( $=\rho U_0^2/2$ )	[ $Pa$ ]
$P_r$	換気駆動力 ( $=P_R - P_w$ )	[ $Pa$ ]
$P_R$	室圧	[ $Pa$ ]
$P_{R^*}$	無次元室内圧	[ - ]
$P_s$	静圧	[ $Pa$ ]
$P_t$	開口部接続方向動圧	[ $Pa$ ]
$P_T$	全圧	[ $Pa$ ]
$P_w$	風圧	[ $Pa$ ]
$Q$	通風量	[ $m^3/s$ ]
$Q_0$	基準風量 ( $=AU_0$ )	[ $m^3/s$ ]
$U$	風速	[ $m/s$ ]
$U_0$	基準風速	[ $m/s$ ]
$\alpha$	流量係数	[ - ]
$\alpha_s$	基本流量係数	[ - ]
$\beta$	流入角・流出角	[ $^\circ$ ]
$\varepsilon$	$k$ の散逸率	[ $m^2/s^3$ ]
$\rho$	空気密度	[ $kg/m^3$ ]

## 注

- 注1) 風向角  $90^\circ$  と  $135^\circ$  条件では、通風量の増加に対して  $P_t$  が必ずしも減少していないが、これは風速計の設置角度に僅かな誤差があったために、開口部法線方向の風速を拾ってしまったものと考えられる。
- 注2) ただし、どの位置で  $P_t$  を定義すべきかは不明なままである。これについては 5 章にて検討する。
- 注3) 参考までに、同一のソフトおよび乱流モデルを用いて実施した、3 章・実験①についての CFD 解析の結果を付図 1, 2 に示す。67.5°条件の図 9 と付図 1 を比較すると、静圧分布、風速ベクトルともに誤差はあるものの、傾向は類似しており、特に通風時の (b) と (c) では、開口部風上端の静

圧上昇と、開口部風下端の大きな静圧低下が再現されている。一方、112.5°条件の図 10(a)と付図 2(a)を比較すると、実験では、チャンパー隅角部で剥離した流れが開口部のある壁面で再付着しているのに対し、CFD 解析では再付着がみられない。そのため、開口部近傍の気流がアプローチフローと逆方向に流れている点では同じであるものの、風速分布は大きく異なる。また、床面静圧についても正しく再現されていない。しかしながら、通風時の(b)(c)において、開口部付近で大きな静圧変化が生じていないことは実験と同様である。従って、チャンパー後流域での流れ場の再現には問題があるが、開口部近傍の外部気流と開口部流出気流との間の定性的な関係は再現されており、本解析方法を実験結果の解釈のために補助的に用いることは可能と考えられる。

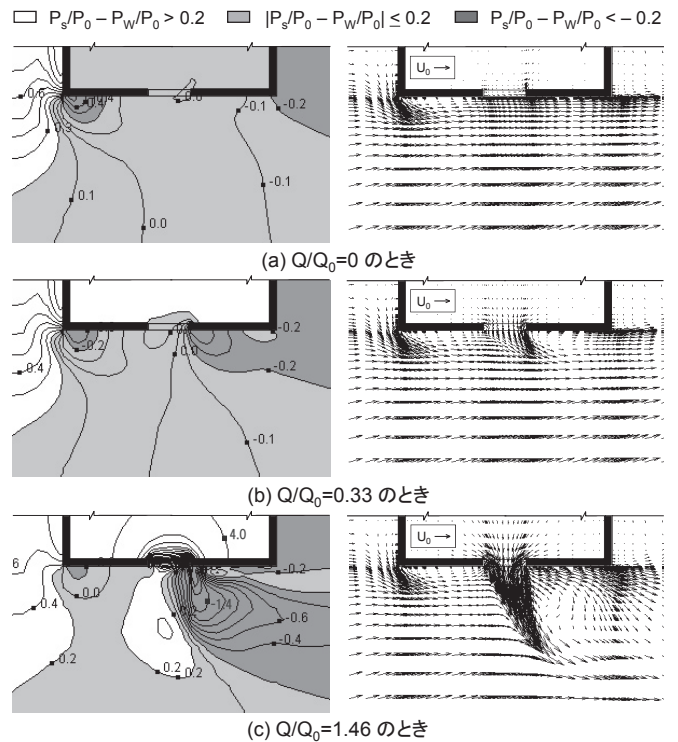
- 注4) 開口部内の複数の場所から同時に発生した流出気流が、ある時刻にそれぞれどの位置に到達するかを求め、それらの座標を開口部通過時の流量で重み付け平均したものを重心位置と定義した。また、到達位置それぞれにおける圧力を開口部通過時の流量で重み付け平均したものを平均圧力と定義した。
- 注5) 開口部からかなり離れた位置で  $P_d$  が最大となる場合があったが、これは流管の収縮によるものではなく、外部気流との混合が影響したものと考えられることから、開口部付近で  $P_d$  が極大となる位置を収縮部位置と判断した。
- 注6) 開口部の形状やサイズが異なれば、この高さは変化する。なお、形状やサイズの異なる数種の開口部についても CFD 解析を実施し、 $P_d$  の定義を無風条件時の収縮部高さ以下の平均値とすることにより、同様の結果が得られることを確認している。ただし、CFD 解析の定量的な再現精度は確認していない。

#### 本論文に関連する既発表論文

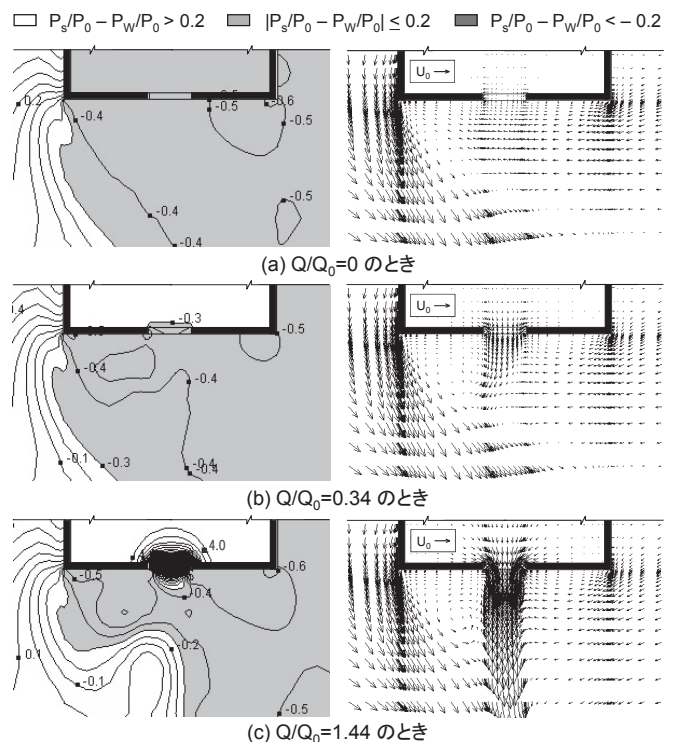
- [1] 後藤伴延, 大場正昭, 倉渕隆, 遠藤智行, 赤嶺嘉彦, 野中俊宏, 下地恒英, 門脇由子, 川瀬智文: 開口部の通風性能評価に関する研究 その 24 流出開口部の流量係数変化に関する実験的検討, 日本建築学会年次大会, D-2, pp.843-844, 2007.8
- [2] 田村奏子, 武村沙耶, 後藤伴延, 大場正昭, 倉渕隆: 通風時における流出開口部の流量係数変化に関する研究, 日本建築学会中国支部研究発表会, pp.377-380, 2011.3

#### 参考文献

- 1) 石原正雄: 建築換気設計, 朝倉書店, 1969
- 2) S. Murakami, S. Kato, S. Akabayashi, K. Mizutani and Y.D. Kim: Wind tunnel test on velocity pressure field of cross-ventilation with open windows, ASHRAE Transactions, Vol.97, pp.525-538, 1991
- 3) 勝田千利, 関根毅: 建築物壁面開口部による換気に関する実験的研究 (その 1) 特に開口部の圧力損失係数と風圧係数について, 日本建築学会論文報告集, 第 68 号, pp.116-120, 1961.6
- 4) B.J. Vickery and C. Karakatsanis: External wind pressure distributions and induced internal ventilation flow in low-rise industrial and domestic structures, ASHRAE Transactions, Vol.93, Part2, pp.2198-2213, 1987
- 5) 倉渕隆, 大場正昭, 遠藤智行, 赤嶺嘉彦: 通風時の換気量予測法に関する研究 (第 1 報) 局所相似モデルの概念と風洞実験による検証, 日本建築学会環境系論文集, 第 607 号, pp.37-41, 2006.9
- 6) 大場正昭, 倉渕隆, 後藤伴延, 遠藤智行, 赤嶺嘉彦, 野中俊宏: 通風時の換気量予測法に関する研究 (第 2 報) 流入開口部における局所相似モデルの適用性に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 第 617 号, pp.25-30, 2007.7
- 7) T. Endo, T. Kurabuchi, M. Ohba, Y. Akamine, M. Kamata: A fundamental study on the air flow structure of outflow openings, International Journal of Ventilation, Vol.2, No.4, pp.439-446, 2004.3
- 8) D. Etheridge and M. Sandberg: Building ventilation - Theory and measurement, Wiley, 1996



付図 1 実験①の風向角 67.5°条件を CFD 解析により再現した場合の開口部周辺の床面静圧係数( $P_s/P_0$ )と風速ベクトル



付図 2 実験①の風向角 112.5°条件を CFD 解析により再現した場合の開口部周辺の床面静圧係数( $P_s/P_0$ )と風速ベクトル

(2011年8月10日原稿受理, 2011年12月26日採用決定)