

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

通風時の換気量予測法に関する研究 (第2報)

INVESTIGATION ON APPLICABILITY OF LOCAL DYNAMIC SIMILARITY MODEL
FOR INFLOW OPENINGS

Prediction accuracy of flow rate of cross-ventilated buildings (Part 2)

大場正昭*¹, 倉渕 隆*², 後藤伴延*³, 遠藤智行*⁴赤嶺嘉彦*⁵, 野中俊宏*⁶

Masaaki OHBA, Takashi KURABUCHI, Tomonobu GOTO, Tomoyuki ENDO,

Yoshihiko AKAMINE and Toshihiro NONAKA

The previous paper confirmed that the local dynamic similarity model can predict discharge coefficients, which vary with wind direction and opening position, if some requirements are met. Four types of wind tunnel experiments were carried out in this study to investigate how strictly these requirements have to be met when the model is applied to inflow openings. It was thus found that the model should not be applied when the opening is in a flow separation region, because it does not consider the effect on the discharge coefficient of recirculating flow generated by flow separation. It was also found that the effects of the direction of flow tangential to the opening, the profile of this flow over the opening and a wall hindering the diffusion of incoming air flow near the opening were generally small or negligible. Thus, there are no substantial problems in applying the model when the direction or profile of the tangential flow is changed or when there is a wall near the opening.

Keywords : Cross-Ventilation, Local Dynamic Similarity, Discharge Coefficient, Inflow angle, Wind Tunnel Experiment

通風, 力学的局所相似, 流量係数, 流入角, 風洞実験

1. はじめに

建築における省エネルギー手法の一つとして, 自然通風への期待が近年益々高まっているが, 自然通風を有効利用するためには, 精度の良い通風量予測が不可欠である。従来, 通風量予測精度を低下させている要因として, 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^{1, 2)}, 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^{3, 4)}, などが指摘されている。

既報³⁾では, 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て, その変化の様相を合理的に説明するモデル—通風局所相似モデル—を提案した。本モデルは, 開口部周辺の圧力場が図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れるとし, 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^{注1)}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とするものである。また, 表1に示すように流量係数 α と流入角 β は, それぞれ P_r と P_n の比および P_n と P_t の比に相当しているので, 本モデルの考え方に従えば, これらは P_t と P_r

の比によって一意に決定できることになり, 既報では, この P_t と P_r の比を無次元室内圧 P_R^* として定義した^{注2)}。

さらに既報では, 風向角や開口位置を変えた数種の条件下で風洞実験を行ない, モデルの妥当性を確認している。ただし, モデルが成立するために想定される条件として以下の①~⑤を挙げ, それぞれの条件がどの程度重要であるか, さらなる実験によって明らかにしていく必要があることも指摘している。

- ① 開口部形状は幾何学的に相似である。
- ② 開口面内での P_t , P_w の分布は無い。
- ③ 開口部の接線方向流れの方向が比較条件間で一致している。
- ④ 開口部に作用する接線方向気流の法線方向分布は比較条件間で一致している。
- ⑤ 開口部室内側に, 流入気流の拡散を阻害する壁等が無い。

そこで, 本報では, 上記の条件についてそれぞれがモデルの適用に対してどの程度影響を及ぼすか, 風洞実験によって明らかにすることを目的とする。ただし, 適用条件①については, 開口部特性の問題であるため, それぞれの開口部形状について個別に対応することとし, その方法については別報にて示す予定である。従って, 本

*¹ 東京工芸大学工学部建築学科 教授・工博*² 東京理科大学工学部建築学科 教授・博士(工学)*³ 東京工芸大学大学院工学研究科建築学専攻

COE研究員・博士(工学)

*⁴ 関東学院大学工学部建築学科 講師・博士(工学)*⁵ 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻

特任助教・博士(工学)

*⁶ 東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻

博士後期課程・修士(工学)

Prof., Tokyo Polytechnic University, Dr. Eng.

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

COE Researcher, Tokyo Polytechnic University, Dr. Eng.

Lecturer, Kanto Gakuin University, Dr. Eng.

Project Assistant Prof., The University of Tokyo, Dr. Eng.

Graduate Student, Tokyo University of Science, M. Eng.

報では適用条件②～⑤について検討を行なった。

2. 適用条件②に関する検討

建物壁面に生じる風圧分布の一例として、前報⁵⁾で使用した模型と同様の模型（高さ:幅:奥行き=1:2:2）に、1/4乗則に従うアプローチフローを与えたときの、風上壁面における風圧分布を図2に示す。この図から分かるように、開口面内に大きな P_t 、 P_w の分布が生じるのは、開口が壁面風下端部にある場合、または、開口が壁面風上端部のような剥離域にある場合の二通りあると考えられる。ここで、開口が壁面の風下端部にある場合については、前報の実験結果より局所相似モデルの適用に大きな問題がないことが分かっている。従って、ここでは風向角 67.5° の場合を例として、剥離域に開口がある場合の局所相似モデルの適用性について検討することとした。

2.1 実験方法

実験は図3に示す模型を対象として、東京工芸大学所有のエッフェル型風洞において行なわれた。前報と同様に、模型の風下側壁面にダクトを介して吸引送風機を接続し、通風量を段階的にコントロールしながら測定する方法をとった。アプローチフローは、図4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、模型軒高（150mm）での風速を基準風速として7m/sに設定した。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): 天井面に均等配置された圧力測定孔（21点）で測定された圧力の平均値を室圧とする。

風圧 (P_W): 流入開口を設けながら、流出口を完全に塞いだ状態での室圧をその開口位置での風圧とする。

全圧 (P_t): 開口部中心に全圧管⁵⁾を設置し、その角度を水平または鉛直方向に変化させ、圧力が最大となる角度を求める。そのときの最大圧力をその開口位置での全圧とする。

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。

接線方向風速、法線方向風速 (U_t , U_n): 床面と平行かつ開口部中心を横切る平面上（図5）において、開口面に対する接線方向の風速と法線方向の風速を、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。

流量係数 α 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、実験前には、無風条件下での流量係数（以下、基本流量係数 α_s と呼ぶ）も調べたが、壁面中央に開口がある場合で0.68なのに対して、本実験条件では0.66であり、ほぼ同じであることを確認した。

2.2 実験結果

通風量を変化させながら行なった U_t および U_n の測定結果の一部を図6に示す。風速計の支持具が模型に接触してしまうため、開口面からの距離が5mm以下の測定が出来なかった。そのため、本測定では剥離によって生じる渦を直接観察することは出来ていないが、開口風上端付近の領域で風速ベクトルが壁面から離れる方向へと向かっている様子がみられることから、開口面からの距離が5mm以下の領域で剥離による渦が存在していたと考えられる。また、通風量の増大に伴う開口風上端付近での風速ベクトルの変化の様子から、その渦は通風量が増大するにつれて徐々に模型内へと吸い込まれていたことが推測される。

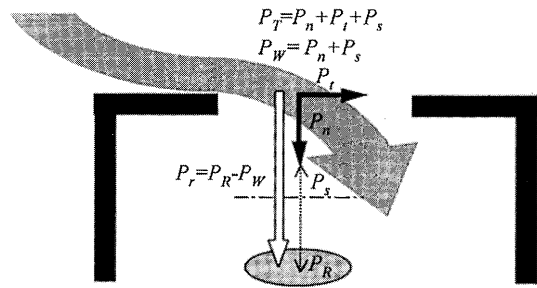


図1 流入開口部周辺における気流の力学的性状⁵⁾

表1 局所相似モデルの基礎式

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

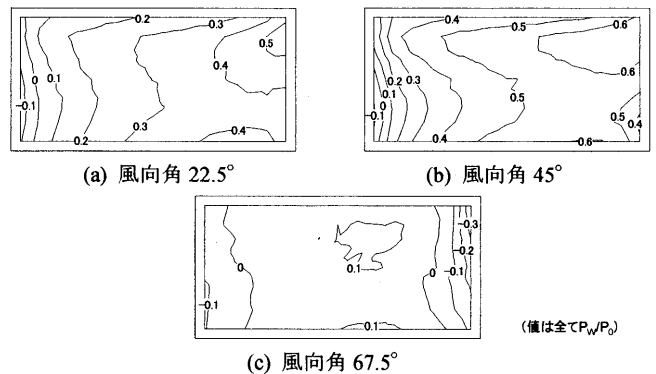


図2 1:2:2 模型の風上壁面における風圧分布（右が風上）

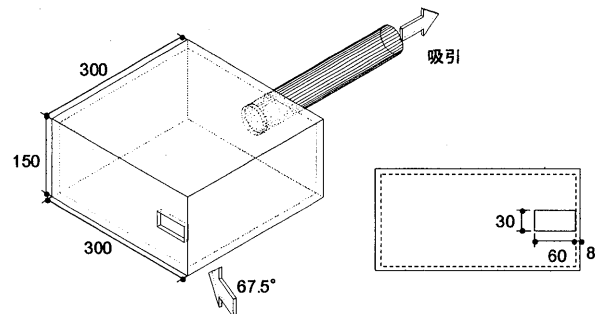
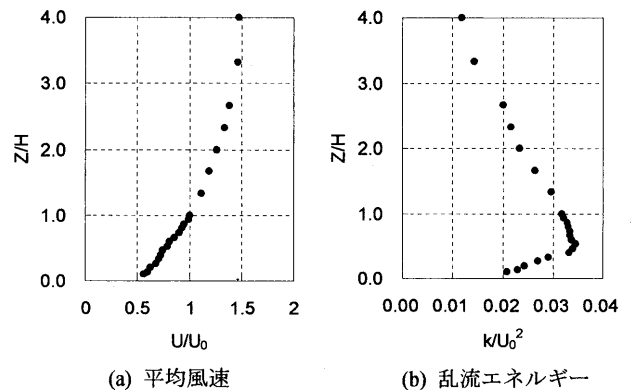


図3 適用条件②に関する実験概要（開口サイズ：60mm×30mm）



(a) 平均風速 (b) 乱流エネルギー

図4 アプローチフローの気流性状

図7に、全圧管を用いて測定された P_T と P_W の差($=P_T-P_W$)によって評価した P_I と、開口面上5mmの位置においてSFPで測定された U_I によって P_I を評価し、開口全域での平均を取ったものとを比較する。ここで、図の横軸は通風量を表している。この図より、どちらの方法で評価した場合にも、 P_I が通風量によって変化していることが分かる。前報でも述べたように、開口部周囲の風向が安定している場合、全圧 P_T は通風量に依存せず概ね一定の値をとるが、本実験では開口部が剥離域にあり、開口部周囲の局所的な流れの様相が通風量により変化するため、結果として全圧 P_T や接線方向動圧 P_I が変化したものと考えられる。また、全圧管を用いて評価した P_I とSFPによって評価した P_I は、通風量に対する変化の傾向は互いに似通っているものの、その大きさは最大で4倍の違いがみられる($Q/Q_0=0.05$ のとき)。この違いは、全圧管による評価が開口部中央の1点のみであるのに対して、SFPによる評価は開口部全域の平均であることに起因すると考えられる。

評価方法の異なる2種類の P_I に基づき、それぞれ求めた P_R^* と α の関係を図8に示す。ここで、 P_R は10段階の通風量で測定したのに対して、 P_I は5段階のみの測定としたため、通風量が一致する P_I がない場合には、最も近い条件での測定値を P_I として P_R^* を算出している。さらに、図8には、本実験での結果と比較するために別途求めた、壁面中央に開口がある場合の P_R^* と α の関係(近似曲線)も同時に示してある。この図から、 P_I をSFPによって複数点で評価することにより、本実験のように開口が剥離域にある場合でも P_R^* の減少に対して α が上昇する傾向が確認される。ただし、壁面中央に開口がある場合と比較すると、 α が大きく低下している様子がみられる。これは、剥離によって生じた渦が開口面内に存在することにより、開口面内の一部が流出気流となるためと考えられる。

従って、 P_I を複数点で評価しても、開口面内に存在する渦が α に及ぼす影響を考慮できないことから、開口が剥離域にある場合に局所相似モデルを適用することは適切でないと考えられる。また、そもそも通風量によって開口部周囲の流れの様相が大きく変化する条件(P_T や P_I が大きく変化する条件)では、 $P_W=P_n+P_s$ という関係も変化している可能性が高く、その意味においてもモデルの適用は困難であると考えられる。

3. 適用条件③に関する検討

壁面を沿う外部気流は、位置によって必ずしも一定方向に流れていない。そこで以下では、開口部を回転させることによって、開口部に対する外部気流の流れ方向を仮想的に変化させ、その影響の程度について検討を行なうこととした。

3.1 実験方法

実験は図9に示す模型を用いて行なわれた。使用した風洞及びアプローチフローの鉛直分布は2章の実験と同様であるが、模型軒高(100mm)で7m/sとなるように風速を設定した。実験条件は、開口を壁面中央に水平に設置したものを基本として、そこから45°回転させた条件、90°回転させた条件の3つを設定し、風向角は22.5°、45°、67.5°の3段階で変化させた。各実験条件について、2章と同様の方法により P_R 、 P_W 、 Q の測定を行なった^{注3)}。ただし、各実験条件ともに開口面の中心は変わらないことから、 P_T は基本条件のみで測定し、その他の条件でも同じ値を用いた。

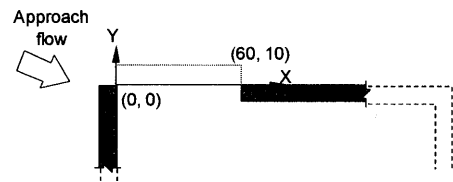


図5 開口部近傍風速(U_I , U_n)の測定面(単位:mm)

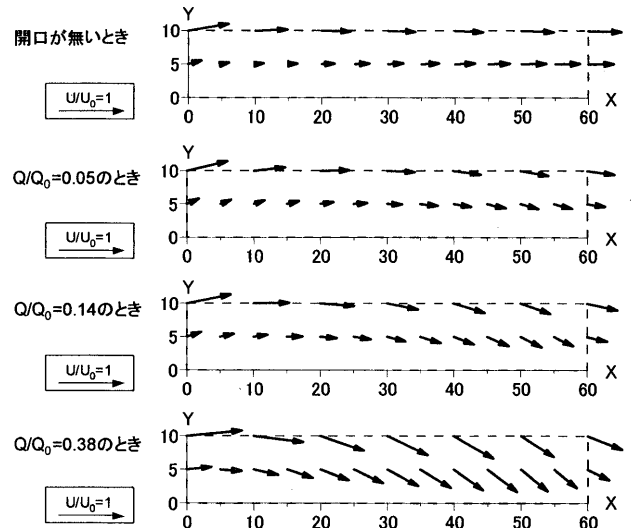


図6 開口部近傍風速ベクトル分布(Q/Q_0 は基準化した通風量)

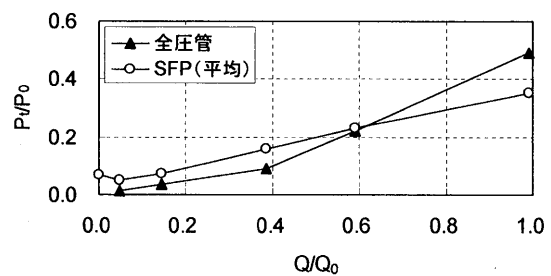


図7 通風量による P_I の変化

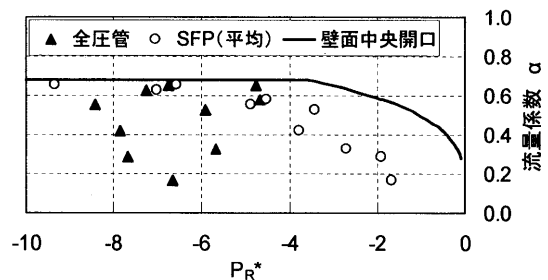


図8 開口が剥離域にある場合の P_R^* と α の関係

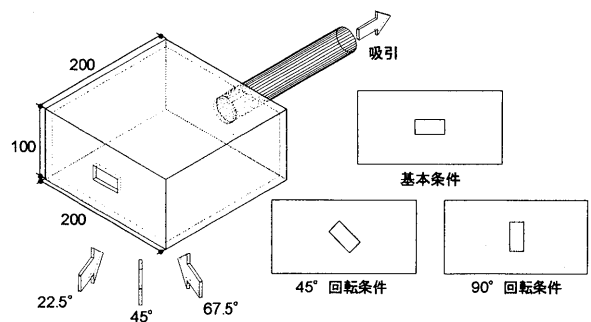


図9 適用条件③に関する実験概要(開口サイズ:40mm×20mm)

3.2 実験結果

各実験条件で求められた P_R^* と α の関係を図 10 に示す。開口の回転角度が増すにつれて、同一 P_R^* に対する α がやや小さくなる傾向がみられるものの、その差は最大でも 0.1 程度であり、 P_R^* に対する α の変化の様相もほぼ一致している。従って、開口面内に 1 方向のルーバーがあるような、外部気流の方向性がより重要な意味を持つ場合については、別報にてさらに検討する予定であるが、本実験のような単純な開口形状では、条件③はモデルの適用に際して大きな障害とならないことが分かった。

4. 適用条件④に関する検討

開口部に作用する接線方向気流の法線方向分布は、風向角や開口位置、建物形状によって異なる。局所相似モデルの適用可能性が明らかになっている壁面中央の開口位置においても、その接線方向気流の分布は風向角によって異なっていると予想される。そこで以下では、壁面中央位置における接線方向気流の法線方向分布を実際に測定し、その違いを把握した上で、壁面上に突起物を設けることによって、この分布をさらに変化させた場合の局所相似モデルの適用性について検討を行なうこととした。

4.1 実験方法

実験は図 11 に示す様に、壁面中央の開口について風向角を 22.5° 、 45° 、 67.5° にした場合と、風向角 67.5° で壁面風上端部に 20mm の突起を設けた場合について実施した。使用した風洞及びアプローチフローの鉛直分布は 2 章の実験と同様である。それぞれの場合について、開口部中央の法線上で接線方向風速 U_l の測定を行なった。 U_l 測定は基本的に開口を閉じて通風の無い状態で行なったが、風向角 67.5° の突起がある場合と無い場合については通風時の測定も実施した。また、それぞれの場合で P_R 、 P_W 、 Q 、 P_T を 2 章と同様に測定し、風向角 67.5° の突起がある場合については、壁面全体の風圧分布の測定も行なった。

4.2 実験結果

風向角 67.5° で壁面風上端部に突起を設けた場合における壁面全体の風圧分布 (図 12) をみると、壁面中央までは負圧が及んでいない。また、この場合における通風量と P_T の関係 (図 13) をみても、 P_T は通風量に依存せず概ね安定していることから、本実験で対象とする開口部は剥離域の外にあると推測される。

図 14 に、それぞれの場合で測定された U_l の法線方向分布を示す。風向角 22.5° 、 45° では一様に近い分布を示しているが、 67.5° では壁面近傍で風速が減衰している。また、 67.5° で突起がある場合には、風速の減衰がさらに広範囲にわたっており、その他の U_l 分布と大きく異なっている。

P_R^* と α の関係を図 15 に示す。 67.5° で突起がある場合も含め、全ての場合で P_R^* と α の関係はほぼ一致している。本実験では、開口面に設置された全圧管で P_T を測定し、 P_T から P_W を差し引くことによって P_l を評価している。即ち、モデルを構成する 3 つの圧力 (P_l 、 P_n 、 P_f) が全て開口面で評価されていることになり、図 15 において P_R^* が一致することは、開口面において力学的相似が成立していることを意味している。従って、本実験の結果より、開口面の外側で U_l 分布が違っていても開口面において力学的相似が成立していれば、流量係数は一意に決まると考えられ、 P_l を開口面で評価している限

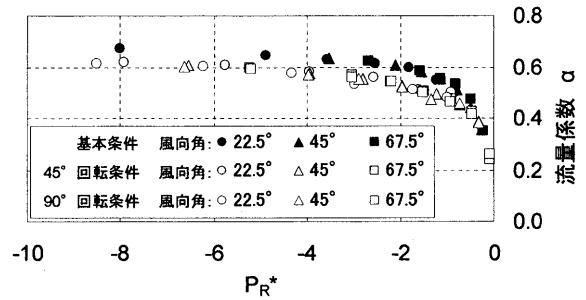


図 10 外部気流の流れ方向が異なる条件間での P_R^* と α の関係の比較

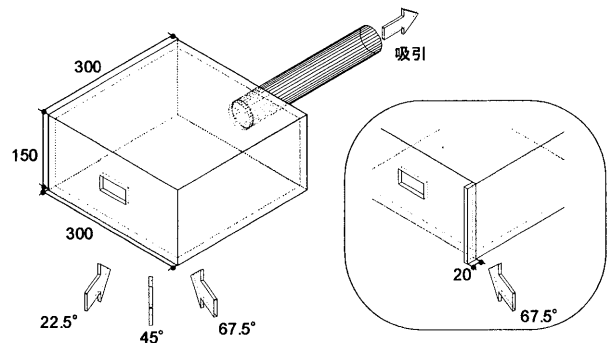


図 11 適用条件④に関する実験概要 (開口サイズ: $60\text{mm} \times 30\text{mm}$)

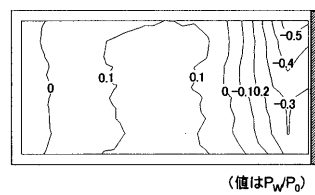


図 12 風向角 67.5° で突起がある場合の壁面風圧分布

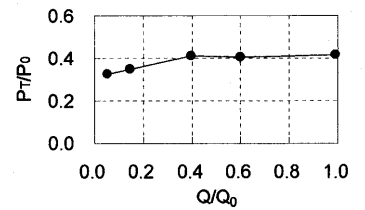


図 13 風向角 67.5° で突起がある場合の通風量と P_T の関係

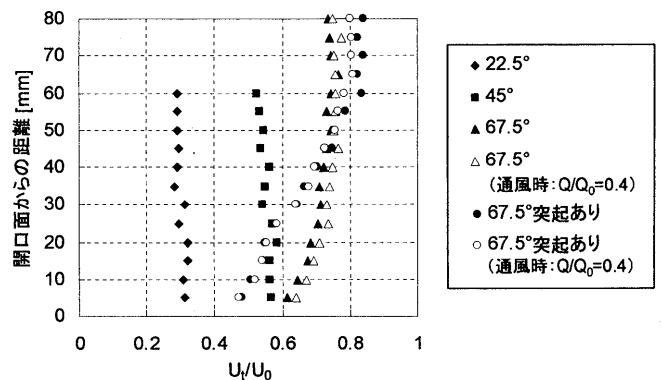


図 14 開口部中央における U_l の法線方向分布

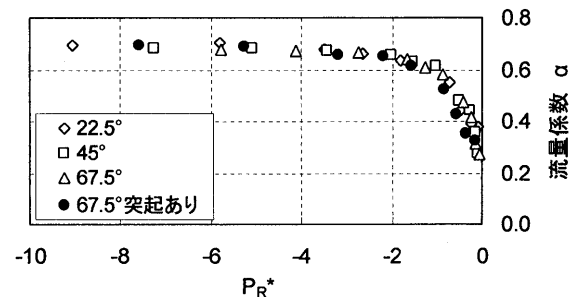


図 15 U_l の法線方向分布が異なる条件間での P_R^* と α の関係の比較

り、条件④を満たさなくてもモデルの適用は可能であると考えられる。

5. 適用条件⑤に関する検討

開口が室内側の壁面に接する様な状況では、室内における通風気流の拡散が阻害される。以下では、このような状況を想定し、模型内に壁や床を設けた場合の局所相似モデルの適用性について検討を行なった。

5.1 実験方法

実験は図16に示す様に壁面中央の開口を対象として、模型内に床または壁を開口の縁と接するように設けた3つの条件で行なわれた。使用した風洞及びアプローチフローの鉛直分布は3章の実験と同様である。各実験条件において、風向角は22.5°、45°、67.5°の3段階で変化させて P_R 、 P_W 、 Q の測定を行なった。このとき、 P_R を天井面全体で評価するため、模型内に設置した壁には孔をあけ、室内の圧力なるべく均一になるようにした。また、 P_T は開口の縁に床や壁を設けない状態（基本条件）で測定し、全ての条件に対してこの値を用いた。

5.2 実験結果

実験前に無風状態で求めた各条件での基本流量係数 α_s を図17に示す。開口に壁や床が接している条件では、基本条件に比べて僅かに α_s が低下しているものの、ほぼ同様であった。図18に、各条件で求めた P_R^* と α の関係をそれぞれ示す。比較のために、基本条件で得られた P_R^* と α の関係の近似曲線を同時に示したが、全ての条件において概ね一致した関係が得られている。従って、条件⑤を満たしていなくても、モデルの適用にはほぼ影響が無いと考えられる。

6. まとめ

本研究では、局所相似モデルが成立するために想定される条件①～⑤のうち、②～⑤について、それぞれがモデルの適用に対してどの程度影響を及ぼすかを明らかにするために風洞実験を行なった。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 条件②に抵触する剥離域に開口がある場合については、剥離によって生じる渦の影響で、開口面内の一部に流出気流が生じてしまうため、 P_R^* と α の関係が他の場合とは異なってくる。従って、剥離域に開口がある場合にはモデルの適用を避けるべきである。
- ルーバー等を持たない単純な開口では、条件③を満たしていなくても、 P_R^* と α の関係に大きな変化は無い。従って、モデルを適用しても大きな問題は生じない。
- P_T を開口面で評価している限り、条件④を満たさなくてもモデルは適用可能である。
- 条件⑤を満たしていなくても、 P_R^* と α の関係は概ね維持される。従って、モデルは適用可能である。

今後は、流出開口部における局所相似モデルの適用性についても検討を進めて、ブロックモデルによる通風量予測の高精度化を目指すと共に、本モデルの通風理論に基づき、通風を促進する開口部の開発などを行っていく予定である。また、本モデルをブロックモデルに適用した場合、通風量のみでなく、通風気流の室内への流入角度をも予測することが出来る。これらの情報を境界条件として室内

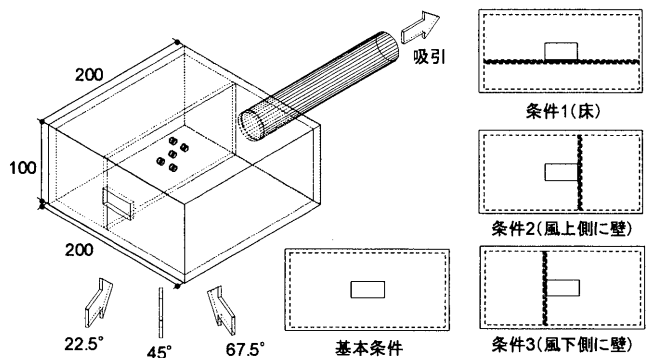


図16 適用条件⑤に関する実験概要（開口サイズ：40mm×20mm）

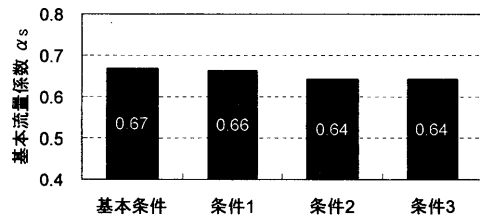


図17 基本流量係数の比較

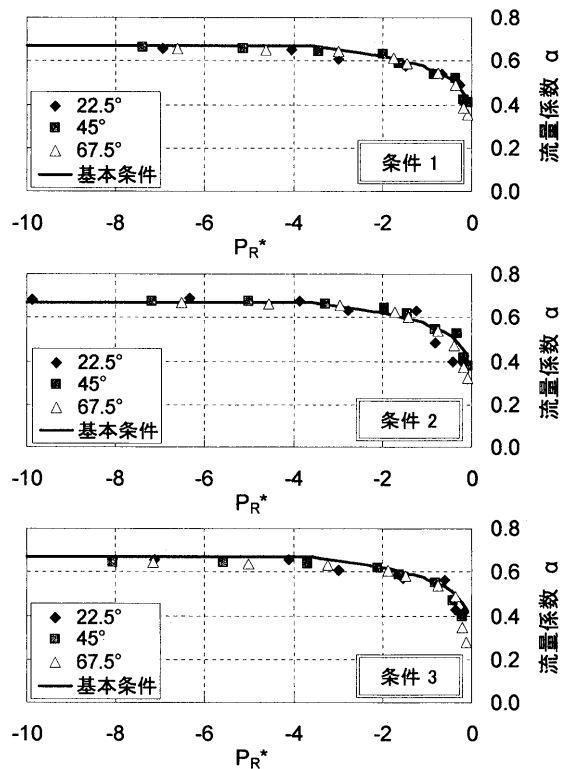


図18 室内の壁面が開口に接する場合の P_R^* と α の関係

空間のCFD解析を行えば、さらに詳細な室内環境予測も可能となることから、このようなCFD解析との連成手法の開発も行っていく予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、東京大学・鎌田元康教授より貴重なご助言を頂いた。記して謝意を表す。また、本研究の一部は文部科学省・21世紀COEプログラム（平成15年度～平成19年度：東京工芸大学「都市・建築物へのウインド・イフェクト」、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
H	模型高さ
k	乱流エネルギー
P_n	開口部法線方向動圧 ($=\rho U_n^2/2$)
P_0	基準動圧 ($=\rho U_0^2/2$)
P_r	換気駆動力 ($=P_R - P_W$)
P_R	室圧
P_{R^*}	無次元室内圧
P_s	開口部静圧
P_t	開口部接線方向動圧 ($=\rho U_t^2/2$)
P_T	開口部全圧
P_W	風圧
Q	通風量
Q_0	基準風量 ($=AU_0$)
U	風速
U_n	開口部法線方向風速
U_0	基準風速
U_t	開口部接線方向風速
α	流量係数
α_s	基本流量係数
β	流入角
ρ	空気密度

注

注1) 付け加えると、流入開口部においては、3つの圧力 P_n , P_t , P_r について、このうち2つが明らかになれば残りの1つも求まる関係にあるといえる。

なぜなら、既報⁵⁾および本報の実験から、 P_n が P_r に対して単調増加の関係、 P_t に対して単調減少の関係にあることが明らかであり、この関係に従えば、 P_t と P_r の組み合わせに対する P_n だけでなく、 P_n と P_t の組み合わせに対する P_r 、または、 P_n と P_t の組み合わせに対する P_r も一つの値しか取り得ないからである。

注2) 注1)で述べたように、3つの圧力 P_n , P_t , P_r は、そのうち2つが明らかになれば、残りの1つが求まる関係にあるといえる。さらに、この3つの圧力の関係が相似性を持つと考えれば、これら3つの圧力のうち2つの圧力の比に相当する流量係数 α 、流入角 β 、無次元室内圧 P_{R^*} については、 P_{R^*} が明らかになれば α および β が求まる関係にあるというだけでなく、そのいずれか1つが明らかになれば残りの2つも求まる関係にあるといえる。

注3) ただし、室圧 P_R の測定点は9点であり、2章と異なる。天井面に均等配置されていることに関しては2章と同様。また、5章の実験に関しても、同じ模型を使用しているため室圧測定点は9点である。

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) Vickery B.J. 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) 倉淵 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

(2006年11月9日原稿受理，2007年3月16日採用決定)