複数開口を有する室を対象とした気流の乱れによる換気効果に関する研究 (その9)風洞実験による換気量評価

気流の乱れ	換気量	風洞実験
風圧係数	風圧係数差	PFR

1. はじめに

本研究では、主に風圧係数差が微小となる場合の風力換 気量に着目し、その換気量の簡易予測手法の提案を最終 目標としている。既報¹⁾では微小な風圧係数差における2 開口で濃度ベースの換気量である Purging Flow Rate (PFR)², ³⁾と風速ベースの通気量である Air Flow Rate (AFR) で換気 量の評価を行い、オリフィス式に基づく一般的な換気量予 測手法が不適切となる風圧係数差の範囲を示した。前報⁴⁾ では脈動と混合による換気効果を考慮することを意図し て、風圧係数差の標準偏差と開口近傍風速をパラメータに 組み込んだ換気量予測式の提案を行った。しかしこれらの 検討は全て LES を用いた CFD 解析で行っており、得られ た知見は実験による検証に欠けている。そこで本報では風 洞実験により、1. 風圧係数の時間平均値の測定、2. 風圧係 数差の瞬時値の測定、3.トレーサーガス法による換気量測 定を行った。これにより今後 CFD 解析で精度検証を行う ための真値を取得するとともに、風圧係数差が比較的小さ な範囲でのオリフィス式の予測精度について検討を行う。

2. 対象モデル

本報で対象とする室モデルは既報¹⁾の CFD 解析と同様、 壁厚 2.0 mm、外寸一辺 200 mm の単純モデルで、40×40 mmの開口を2つ有する。開口設置面の条件として、風 上側から見て右側面と風上面 (Case FR)、右側面と風下面 (Case BR)、右側面と左側面 (Case LR) の3種を設定した(図 1)。本報では多くの風圧係数差の条件下で換気量を評価 するため、3種の開口設置面条件において右側面の開口位 置をパラメータとして水平方向に移動させて異なる7箇所

正会員	○小林知広*1
同	Eunsu Lim *2
同	梅宮典子 *3
同	藤田拓也 *4

を設定し、計21条件設定した。なお、他方の開口位置は 固定した。開口部中心高さは全条件で模型中心高さの100 mm で統一した。これらの条件を表1にまとめて示す。な お、同表には後述する実験結果も併せて記載している。

3. 風圧係数測定実験

3.1 実験概要

実験は大阪市立大学研究用風洞で行った。乱れによる換 気量評価のための基礎情報として、まずは開口を有しない シールドモデルを用いて風圧係数の取得を行う。さらに詳 細な検討のため、全21条件における2つの開口の中心想 定位置間における風圧係数差の瞬時値の取得も行った。図 2に実験概要を示す。風洞は測定胴高さ1,200 mm、幅1,500 mmのエッフェル型で、ラフネスブロックと格子を用いて 境界層流を作成して実験を行った。図3に風圧測定用の シールドモデルと風圧測定点を示す。対象としたモデルは 外寸一辺 200 mm のアクリル模型である。風圧測定点は開 ロ中心位置を想定した床上 100 mm の高さに風上面・風下 面の2面と、側面は左右の対称性を仮定して風上側から 見た左側面のみの1面に設置し、10mm間隔で各面19点、 計 57 点設置した。



Ventilation Effect of External Wind Turbulence for a Room with Multiple Openings Part 9. Evaluation of Ventilation Rate based on Wind Tunnel Test

KOBAYASHI Tomohiro, LIM Eunsu, UMEMIYA Noriko, FUJITA Takuya,

風洞内には床上800mmの高さにピトー管を設置し、こ の位置で風速10 m/s に設定した。図4にI型熱線流速計 を用いて 1.0 kHz、60 s で測定したアプローチフローの風 速と乱流強度の鉛直分布を示す。プロファイルは模型が 存在する高さの範囲で概ね1/3.5 乗則に従う分布であっ た。風圧係数算出時の基準動圧は、各点の風圧と同時測 定したピトー管動圧に基づき図4の風速プロファイルに より推定した対象モデル軒高(200 mm)における外部風 速の動圧とした。風圧係数の測定は微差圧計(Validyne 社 , DP45) を用いて 1.0 kHz で 60 s 測定し、基準静圧はピトー 管の静圧とした。また、風圧係数差の瞬時値の測定では、 表1に示す全21条件で想定する2開口それぞれの中心位 置の風圧の差を同微差圧計により直接測定し、ピトー管静 圧は基準動圧の測定のみに用いた。なお、Case LR で風圧 係数差の瞬時値を測定する際は、外部風向を図3(1)に 示す風向から90°模型を回転させて測定を行った。

3.2 実験結果

図5に対象モデルの各面における風圧係数の水平分布 を示す。風上面は概ね0.2~0.6 [-] 程度の正圧であり、左側 面は剥離により風上側で負圧が高く最大で-0.86 [-]、風下 側に行くほど負圧が小さくなり最小で-0.26 [-]となった。 風下面は-0.25 [-] 程度の負圧であり、左右対称の分布が確認される。一方風上面の風圧分布は厳密には対称の分布となっていないが、これは風洞内風速の水平分布に基づく当該風洞の特性が原因と思われる^{注1)}。

Case FR-4, Case BR-4, Case LR-4 における開口中心想定 位置の風圧係数差の瞬時値を図6に示す。Opening1(風 上面/風下面/左側面)の風圧係数からOpening2(右側面) の風圧係数を引いた値を示している。各条件において風圧 係数差の変動が見られるが、Case FR-4 では常に正の値を 取り、常に風上面から流入して側面から流出する通風に よる換気が行われると考えられる。Case BR-4 では風圧係 数差が正から負に変わる瞬間が存在はするがほぼ差圧は 正であり、風下面から側面への流れが主流と推察される。 一方 Case LR-4 では測定点の配置が左右対称であることか ら差圧の正負が変動しており、風圧係数差の平均値は0で あるが開口部間で流入流出する気流の向きが交互に入れ 替わる脈動的な換気が行われると考えられる。

各条件における開ロ中心での風圧係数時間平均値の差 (ΔC_p)と風圧係数差の標準偏差(σ_{ACp})の関係を図7に示す。

-1.0



		G	Central Positio	Central Position of Opening (X, Y, Z) [mm]					
	Description	Case	Opening 1	Op	ening 2	ΔCp [-]	$\sigma_{\Delta Cp}$ [-]	PFR [L/min]	ACR [1/min]
	Opening 1	Case FR-1	(-100,100,0)	r = 40	(-60, 100, 100)	1.46	0.226	333	43.8
	Wind $\begin{array}{c} & & \\ $	Case FR-2	(-100,100,0)	r = 60	(-40, 100, 100)	1.44	0.245	334	44.0
		Case FR-3	(-100,100,0)	r = 80	(-20, 100, 100)	1.33	0.257	322	42.4
		Case FR-4	(-100,100,0)	r = 100	(0, 100, 100)	1.23	0.248	306	40.2
		Case FR-5	(-100,100,0)	r = 120	(-20, 100, 100)	1.10	0.229	299	39.3
		Case FR-6	(-100,100,0)	r = 140	(-40, 100, 100)	0.99	0.201	288	37.9
		Case FR-7	(-100,100,0)	r = 160	(-60, 100, 100)	0.91	0.189	279	36.7
	Opening 1 Wind $\begin{array}{c} V \\ Y \\ Z \\ T \\ Opening 2 \end{array}$	Case BR-1	(100,100,0)	r = 40	(-60, 100, 100)	0.66	0.127	162	21.3
		Case BR-2	(100,100,0)	r = 60	(-40, 100, 100)	0.63	0.136	153	20.1
		Case BR-3	(100,100,0)	r = 80	(-20, 100, 100)	0.53	0.143	141	18.5
		Case BR-4	(100,100,0)	r = 100	(0, 100, 100)	0.43	0.148	130	17.1
		Case BR-5	(100,100,0)	r = 120	(-20, 100, 100)	0.29	0.142	110	14.5
		Case BR-6	(100,100,0)	r = 140	(-40, 100, 100)	0.19	0.127	90.4	11.9
		Case BR-7	(100,100,0)	r = 160	(-60, 100, 100)	0.10	0.103	72.5	9.54
	Opening 1 Y_{T} Wind r	Case LR-1	(0,100,-100)	r = 40	(-60, 100, 100)	0.23	0.178	68.1	8.96
		Case LR-2	(0,100,-100)	r = 60	(-40, 100, 100)	0.20	0.165	64.5	8.48
		Case LR-3	(0,100,-100)	r = 80	(-20, 100, 100)	0.10	0.163	66.4	8.73
		Case LR-4	(0,100,-100)	r = 100	(0, 100, 100)	0.00	0.166	70.5	9.26
		Case LR-5	(0,100,-100)	r = 120	(-20, 100, 100)	0.14	0.164	79.4	10.4
		Case LR-6	(0,100,-100)	r = 140	(-40, 100, 100)	0.24	0.162	81.4	10.7
	Opening 2	Case LR-7	(0.100100)	r = 160	(-60, 100, 100)	0.33	0.157	84.5	11.1

Case FR, Case BR では ΔC_p が大きいときに σ_{ACp} が大きく なるが、それぞれ 1.3 [-]、0.4 [-] を超えると減少する。 方 Case LR では ΔC_p が 0 ~ 0.3 [-] 程度の範囲でばらつく が σ_{4C_P} は概ね一定の値をとる。また、Case BR は Case LR よりも ΔC_p が大きいが、 σ_{ACp} は小さくなっている。これら の結果から、 ΔC_p と σ_{ACp} の間には一貫した明確な関係性が ないと言え、乱れを考慮した換気量評価にあたってはそれ ぞれ独立したパラメータとして取り扱うべきと考える。

4. トレーサーガス法による換気量測定

4.1 実験概要

ΔCp

Wind

Wind 5

Wind 🔙

ΔCp

(1) Case FR-4

(2) Case BR-4

(3) Case LR-4

図 6

ΔCp

開口を設けた室モデルにおける換気量を風洞実験によ り評価するために、CO,ガスの定常発生及び濃度測定によ るトレーサーガス測定を行う。実験概要を図8に示す。は じめに外気濃度の測定のため、CO,ガスを発生させない状 態でマルチガスモニター (LumaSense Technologies, Innova 1312,較正濃度 5,000 ppm) を用いて室モデル内の空気を吸 引し、CO2濃度を測定する。吸引は室の平面中心位置に立 てた外径 3.5 mm の配管から行い、床上 50, 100, 150 mm の 高さでそれぞれ四方に直径 1.0 mm の吸引孔を設けて計 12 点から吸引した。これは室内で平均濃度に近い値の測定を 意図したためである。実験はまず風洞内で気流を発生させ た状態で CO2 濃度を5分間測定し、これを外気濃度とみ なす。その後にボンベから CO, ガスを噴出し、マスフロー コントローラ (Fujikin, FCST 1005 LC) で発生量を 250 sccm に制御して^{註2)}対象モデル内にドージングして11分間継続 して濃度測定を行い、発生後1分のデータは破棄してその 後の10分間の平均値を定常濃度とみなした。なお、ドー ジングは極端な室内濃度分布の発生を避けるため、4箇所 設けた配管の上端(床上高さ50mm)からガス供給を行っ た。図9に室モデル内でのサンプリング及びドージング 位置を示す。

2.5

2

1

0.5

0

1.2

1 0.8

0.6

0.2

0

-0.2

0.8 0.6

0.4

0 -0.2 ΔD

-0.4

-0.6

-0.8

<u></u> 0.2

2Cp 0.4 0

10

20

20

30

Measurement Time [s]

Measurement Time [s]

40

50

60

ACp [-] 1.5



風圧係数差の時間変動

20 30 40 Measurement Time [s]



4.2 結果と考察

図 10 に Case FR-4, Case BR-4, Case LR-4 の CO, 濃度応 答を示す。Case FR-4 は定常の 10 分間で 1,300 ppm 程度の 濃度で安定しており、風圧係数差が大きいため換気量も大 きく比較的低濃度になったと言える。ただし、開口配置を 考慮すると常に流入直後の気流にさらされ空気齢が小さ い位置と考えられるため、真の平均濃度より低い値を測定 している可能性はある。一方、Case BR-4 と Case LR-4 で は濃度に変動が見られ、脈動的な風力換気現象により一度 流出したトレーサーガスの再流入も考えられるため、この 濃度から算出した換気量は流入出する通気量(AFR)より 小さくなる可能性がある。本報は風洞でのトレーサーガス 定常発生法であるため次式でPFRを換気量を評価する^{註3)}。

$$PFR = \frac{m}{c_r - c_o} \left[\frac{m^3}{s} \right] \qquad \dots (1)$$

ここで、mは単位時間当たりの室内 CO_2 発生量 $[m^3/s]$ 、 c_r と c。はそれぞれ前述の室内定常濃度と外気濃度 [-] である。

図 11 に実験で得られた ΔC_p と PFR の関係を従来のオリ フィス式による算定結果(α=0.65で有効開口面積を直列 結合)とともに示す。Case FR は全条件において ΔC_p が大 きくなるとともに換気量が増加し、オリフィス式によく一 致した。Case BR でも同様に ΔC_p が大きくなると換気量の 増加傾向が見られたが、オリフィス式より小さい結果と なった。これは濃度応答からも推察されたように、トレー サーの再流入や室内の分布により局所的に濃度が高くな ることで換気量を小さく評価した可能性がある。つまり、 本来オリフィス式と比較すべきは AFR であるが、換気効 率も考慮した PFR で評価したことに起因する差である可 能性がある。一方、Case LR については ΔC_p は 0 ~ 0.3 程 度の範囲で分布するが換気量は概ね一定の値となった。こ の条件では換気量は ΔC_n に依存せず、気流の乱れが換気 の支配的な要因になっている可能性が考えられる。

次に各条件における σ_{ACp} と PFR の関係を図 12 に示す。 Case LR は σ_{ACP} が一点に集中する傾向が見られる。ここか ら、ΔC。が小さく主に気流の乱れによる換気が行われてい ると考えられるこの条件では、 σ_{ACp} が同程度であることが 換気量が同程度になったことの要因の一つと推察される。 乱れによる換気のメカニズムを考えると o_{4Cb} は換気量の 脈動的な成分を表す指標の一つで乱れによる換気量を予 測する上で重要なパラメータになり得ると言え、今後これ に加えて前報⁴で示したように混合を考慮した評価を実験 に基づいても行う必要があると考える。

5. まとめ

本報では風洞実験によりトレーサーガス法で換気量評 価を行った。結果、Case LR のように風圧係数差が比較的 小さな条件ではオリフィス式で換気量の予測が出来ず、風 圧係数差の標準偏差のように脈動に関連する項目がパラ メータになり得ることが実験でも示された。今後は混合現 象も考慮した評価を行う所存である。

- *1大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 講師 博士(工学)
- * 3 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 教授 博士 (工学)
- *4大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 前期博士課程

400 350 Purging Flow Rate [L/min] **Orifice Equation** 300 Case LR 250 Case FR 200 150 \Diamond \diamond 100 0 <u>∕</u>A ∆ Ę ase BR 50 0 0.2 0 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 ∆Cp [-] 風圧係数差と換気量の関係 図 11 400 [uiu] 350 ╘ Case FR \square Rate 250 200 ╘ Case BR se LR 0 0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 Standard Deviation of $\Delta Cp(\sigma_{\Delta Cp})$ [-] 風圧係数差の標準偏差と換気量の関係 図 12

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費(挑戦的萌芽研究,課題番号 JP16K14347, 研究代表者;小林知広)の助成を受けた。

註釈

- 1)検証のためにターンテーブルを±3°の範囲で微小な角度刻みで 回転して風上面風圧を繰り返し測定したところ、分布は角度に応 じて変化するが風上から左側の風圧係数が若干大きくなる傾向が 一貫して見られたため、風洞内風速の水平分布が原因と判断した。
- 2) 発生量の 250 sccm は、既報¹⁾に基づき本報の検討に近い条件の LES 計算から換気量のオーダーを推測し、風量バランスの観点か ら CO2 発生の体積流量が換気量の 0.5% 以下、かつモデル内平均 濃度が 5,000 ppm を超過しない程度となるよう計画して決定した。
- 3) 本研究ではこれまでに濃度と発生量に基づいて算定する換気量を PFR (Purging Flow Rate)、両開口面の瞬時風速を流入出で区別し て積分した値の時間平均を AFR (Air Flow Rate) と区別している ため、本報でもそれに従った表記を採用している。

参考文献

- 1)藤田拓也,小林知広,梅宮典子:複数の開口を有する室を対象とし た気流の乱れによる換気効果に関する研究(その4)微小な風圧 係数差の対面開口を有する室の換気量評価,日本建築学会大会学 術講演梗概集, D2, pp.927-928, 2016.8
- 2) M. Sandberg and D. Etheridge : BUILDING VENTILATION Theory and Measurement, John Wiley & Sons Ltd, 1996
- 3) 伊藤一秀, 加藤信介, 村上周三: 不完全性混合室内の居住域 換気効率の評価に関する研究 - Particle Tracing による Visitation Frequency, Purging Flow Rate の基礎的解析,日本建築学会計画系論 文集,第 534号,pp41-48,2000.8
- 藤田拓也,小林知広,梅宮典子:複数の開口を有する室を対象と した気流の乱れによる換気効果に関する研究(その8)微小な風 圧係数差での換気量簡易予測,日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017 (投稿中)

Lecturer, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr. Eng. Associate. Prof., Faculty of Science and Engineering, Toyo University, Dr. Eng. Professor, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr. Eng. Graduate Student, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University

*2 東洋大学理工学部 准教授 博士 (工学)