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 7）風洞実験による換気量の評価

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

4. 環境工学 -12. 空気流動基礎 -h. 自然換気・通風のモデリング

気流の乱れ　換気量　風洞実験　風圧係数　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。しかし前述の検討は全て 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が欠けている。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とその変動の測定、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。対象モデルは外寸一辺 200 mm のアクリル模型である。測定点は

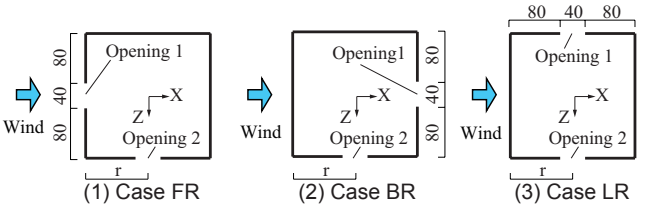


図 1　開口条件

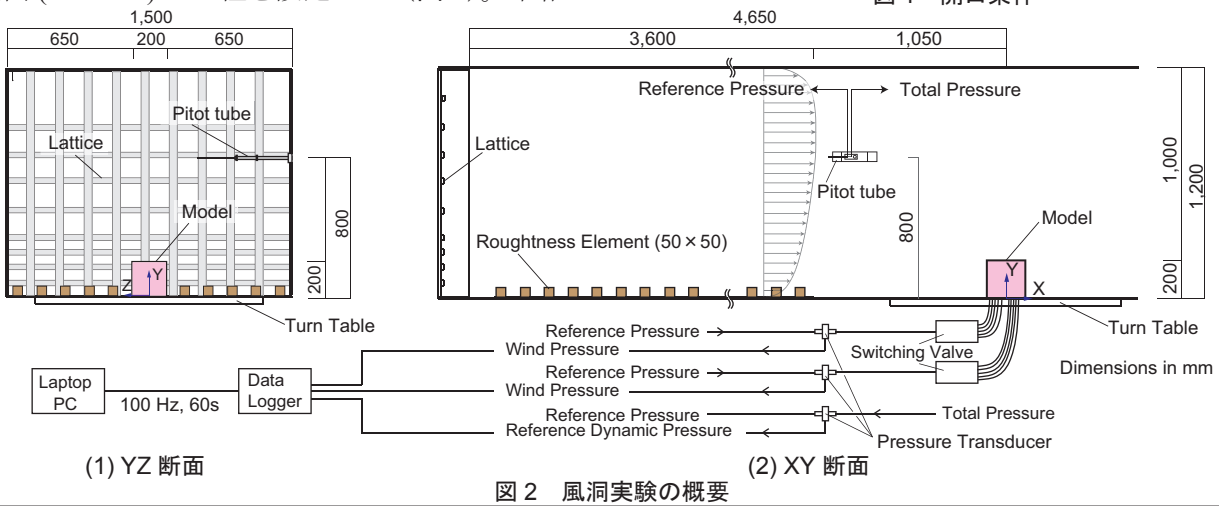


図 2　風洞実験の概要

Ventilation Effect of External Wind Turbulence for a Room with Multiple Openings
Part 7. Evaluation of Ventilation Rate based on Wind Tunnel Test

FUJITA Takuya, KOBAYASHI Tomohiro, LIM Eunsu, UMEMIYA Noriko

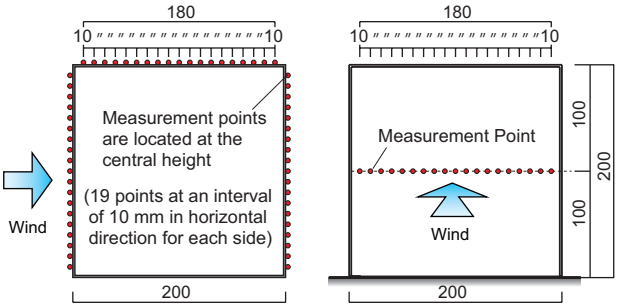
開口中心位置を想定した床上 100 mm の高さに風上側から見て前面・後面の 2 面と、側面は左右対称であるため対称性を仮定して左側面のみの 1 面に設置し、10 mm 間隔で各面 19 点、計 57 点設置した。

風洞内には床上 800 mm 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。風下の風圧係数は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になっていないが、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[註 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。Opening 1（風上面 / 風下面 / 左側面）の風圧係数から Opening 2（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差圧は概ね正であり、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



(1) 平面図　(2) 立面図

図 3　風圧測定模型

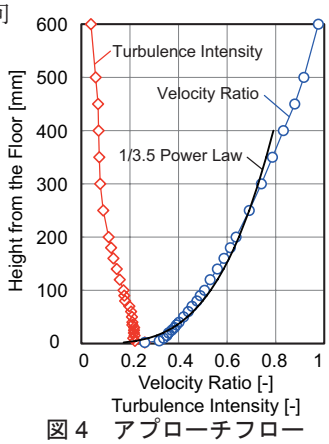


図 4　アプローチフロー

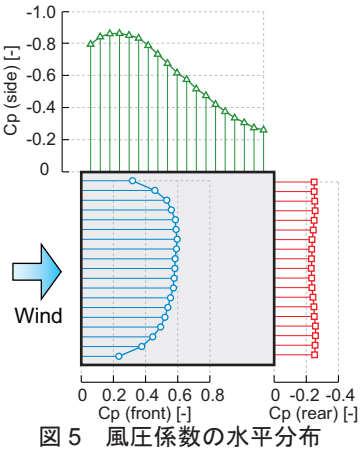
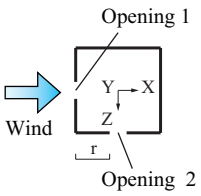
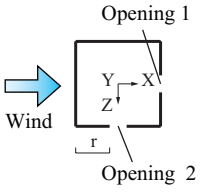
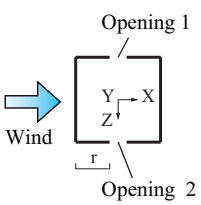


図 5　風圧係数の水平分布

表 1　開口条件と解析結果

Description	Case	Central Position of Opening (X, Y, Z) [mm] Opening 1	Opening 2		ΔCp [-]	$\sigma_{\Delta Cp}$ [-]	PFR [L/min]	ACR [1/min]
	Case FR-1	(-100,100,0)	r = 40	(-60, 100, 100)	1.46	0.226	333	43.8
	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
	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
	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
	Case LR-7	(0,100,-100)	r = 160	(-60, 100, 100)	0.33	0.157	84.5	11.1

われると考えられる。

各条件における風圧係数の時間平均値の差 (ΔC_p) と風圧係数差の標準偏差 ($\sigma_{\Delta Cp}$) の関係を**図 7** に示す。

Case FR, Case BR では ΔC_p が大きいときに $\sigma_{\Delta Cp}$ が大きくなるが、それぞれ 1.3、0.4 を超えると減少する。一方 Case LR では ΔC_p が 0 ～ 0.3 程度の範囲でばらつくが $\sigma_{\Delta Cp}$ は概ね一定値である。また、Case BR は Case LR よりも ΔC_p が大きいが、$\sigma_{\Delta Cp}$ は小さくなっている。これらの結果から、ΔC_p と $\sigma_{\Delta Cp}$ 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。

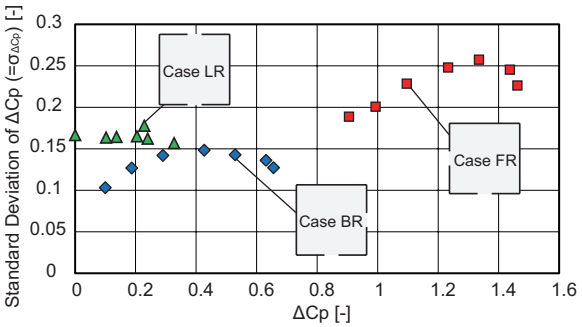


図 7　風圧係数差と風圧係数差の標準偏差の関係

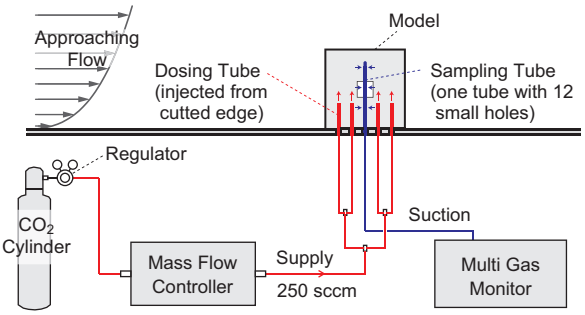


図 8　濃度測定実験の概要

4. トレーサーガス法による換気量測定

4.1 実験概要

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_2 ガスの発生及び濃度測定に基づくトレーサーガス測定を行う。実験概要を**図 8** に示す。CO_2 濃度の測定は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 CO_2 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_2 ガスを噴出し、マスフローコントローラ (Fujikin, FCST 1005 LC) で流量を 250 sccm に制御して[註 2)] 対象モデル内にガスを供給しながら 11 分間継続して濃度測定を行い、発生開始後 1 分のデータを破棄して 10 分平均値を定常濃度とみなした。ドージングは極端な室内濃度分布の発生を避けるため、床上 50 mm の高さで 4 箇所設けた配管上端からガス供給を行った。**図 9** に室モデルの供給・吸引位置を示す。

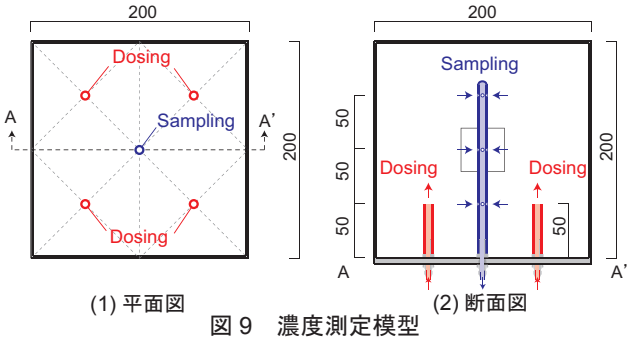


図 9　濃度測定模型

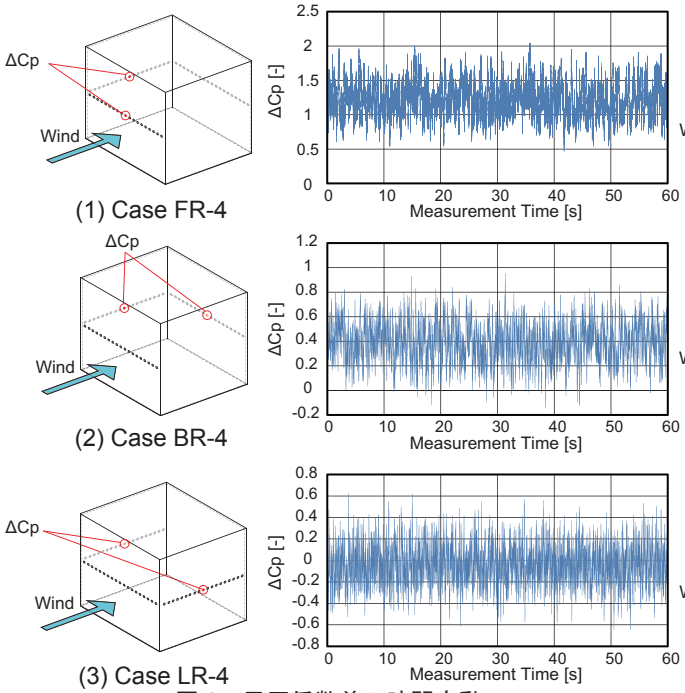


図 6　風圧係数差の時間変動

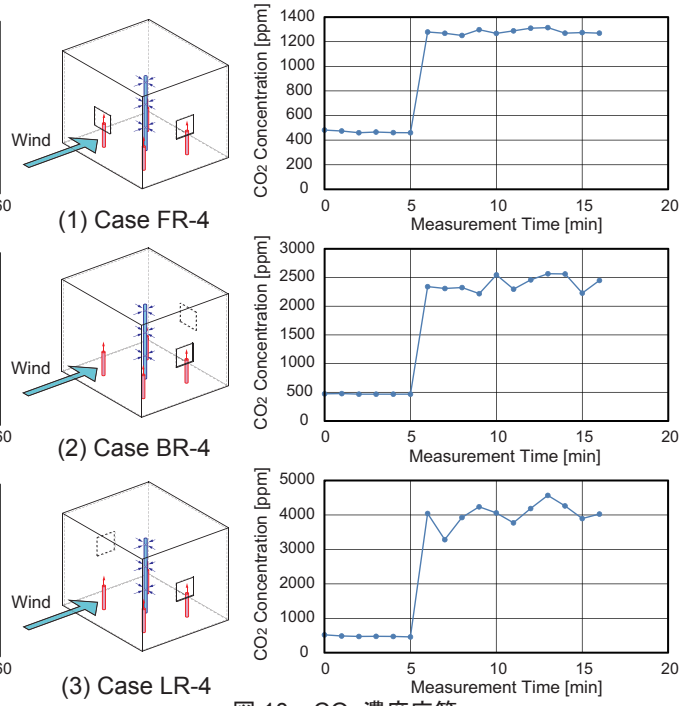


図 10　CO_2 濃度応答

4.2 結果と考察

図 10 に Case FR-4, Case BR-4, Case LR-4 における CO_2 濃度の応答を示す。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。一方、Case BR-4 と Case LR-4 では濃度に若干の変動が見られ、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。換気量の算定は、本報はトレーサーガス定常発生法であるため次式で PFR を評価する[註 3)]。

$$PFR = \frac{m}{c_r - c_o}\ [\mathrm{m^3/s}] \qquad ...(1)$$

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_o 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、換気効率の影響も含む 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_p 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と考えられる。

次に各条件における $\sigma_{\Delta Cp}$ と PFR の関係を**図 12** に示す。Case LR は $\sigma_{\Delta Cp}$ が一点に集中する傾向が見られる。ここから、ΔC_p 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、$\sigma_{\Delta Cp}$ 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 $\sigma_{\Delta Cp}$ 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の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検討する必要があると考える。

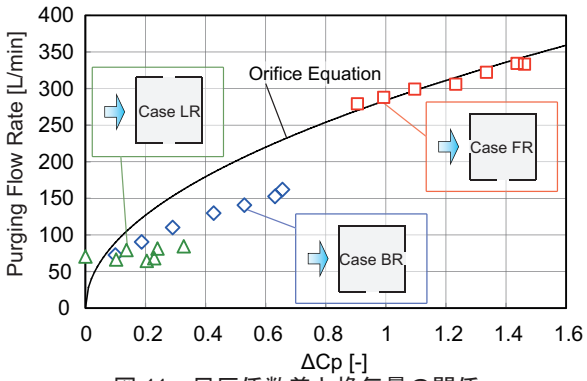


図 11　風圧係数差と換気量の関係

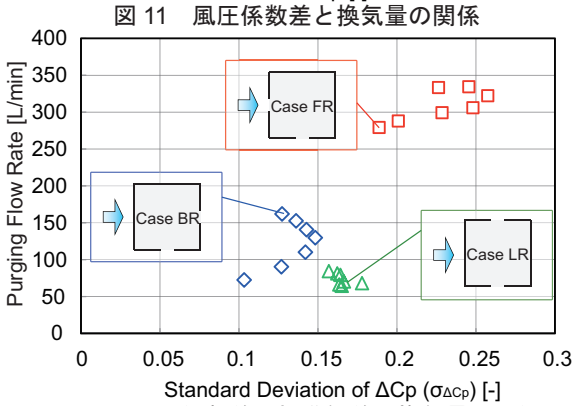


図 12　風圧係数差の標準偏差と換気量の関係

5. まとめ

本報では風洞実験により換気量評価を行った。その結果、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。

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面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 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 CO_2 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 ,pp.41-48,2000.8
4) 小林知広，梅宮典子，藤田拓也：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 6）微小な風圧係数差での換気量の簡易予測手法の検討，日本建築学会近畿支部研究報告集，第 57 号・環境系，2017（投稿中）

＊1 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　Graduate Student, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University
＊2 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）　Lecturer, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr. Eng.
＊3 東洋大学理工学部　准教授　博士（工学）　Assoc. Prof., Faculty of Science and Engineering, Toyo University, Dr. Eng.
＊4 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）　Professor, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr. Eng.