

## 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

正会員 ○藤田拓也<sup>\*1</sup> 同 小林知広<sup>\*2</sup> 同 梅宮典子<sup>\*3</sup>

### 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

対面開口 風圧係数 CFD RANS LES

#### 1. はじめに

2 開口を有する室の風力換気量算定には一般的に以下の換気の式が用いられる。

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\alpha_1 A_1)^2} + \frac{1}{(\alpha_2 A_2)^2}}} U \sqrt{C_1 - C_2} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \dots(1)$$

ここで、 $A$ : 開口面積 [ $\text{m}^2$ ]、 $C$ : 風圧係数 [-]、 $U$ : 外部風速 [ $\text{m/s}$ ]、 $\alpha$ : 流量係数 [-] である。この式では単一開口や風圧係数差がない複数開口で換気量が 0 となるが、実際には気流の乱れで換気が生じる。乱れによる換気として単一開口を扱った研究はこれまでも見られ、そのメカニズムは室内空気の圧縮性による脈動現象と開口部での乱流拡散による混合現象の 2 種と言われている<sup>1)</sup>。複数開口においても脈動と混合のメカニズムで換気が行われており、檜崎・山中ら<sup>2,3)</sup>、河野・加藤ら<sup>4)</sup>による研究例も見られるが、風圧係数差が微小な場合での換気効果は不明な点も多い。既報<sup>5)</sup>では風圧係数差が 0 となる 2 開口で実質的な換気量として Purging Flow Rate (PFR)<sup>6,7)</sup> を評価し、単一開口との差異を示した。本報では微小な風圧係数差の対面開口条件を対象として RANS と LES を用いた CFD 解析を行い、(1) 式の精度を明らかにする。また換気量評価として、PFR に Air Flow Rate (AFR) を加えた 2 種の指標を用いて評価した結果を報告する。

#### 2. 解析概要

##### 2.1 解析対象及び解析条件

既報<sup>5)</sup>と同様に縮小模型による風洞実験を模擬した CFD 解析を行った。解析領域は幅 1,000 mm、高さ 1,000 mm、長さ 3,200 mm の流路として、風向に対して側面に対面開口を有する一辺 200 mm の立方体模型を室モデルとして設置した (図 1)。図 2 に開口条件を示す。開口は風上側から見て左側開口部 (開口 1) の位置を固定し、右側開口部 (開口 2) を X 軸方向に移動させることで異なる風圧係数差を 6 条件設定した。開口サイズは全条件で 40×40 mm とし、開口部中心高さは 100 mm、壁厚は 2.0 mm とした。表 1 に各開口条件における開口の風圧係数を示す。なお、風圧係数は既報<sup>8)</sup>で LES により行った開口を設置しない条件での解析結果と、同モデルで SST  $k-\omega$  モデルを適用した際の結果からそれぞれ取得した。

##### 2.2 CFD 解析手法

RANS と LES による CFD 解析を行う。RANS では SST  $k-\omega$  モデルを用いて流入境界条件は図 3 の境界層流から乱流エネルギー  $k$  と比散逸率  $\omega$  を与えた。LES では標準  $k-\varepsilon$  モデル (SKE) の結果を初期条件とし、計算時間間隔を 1/2,000 [s]、計算開始後の 2,000 time step (=1.0 [s]) を SKE から LES への移行期間とみなして結果を破棄し、その後の 19 [s]

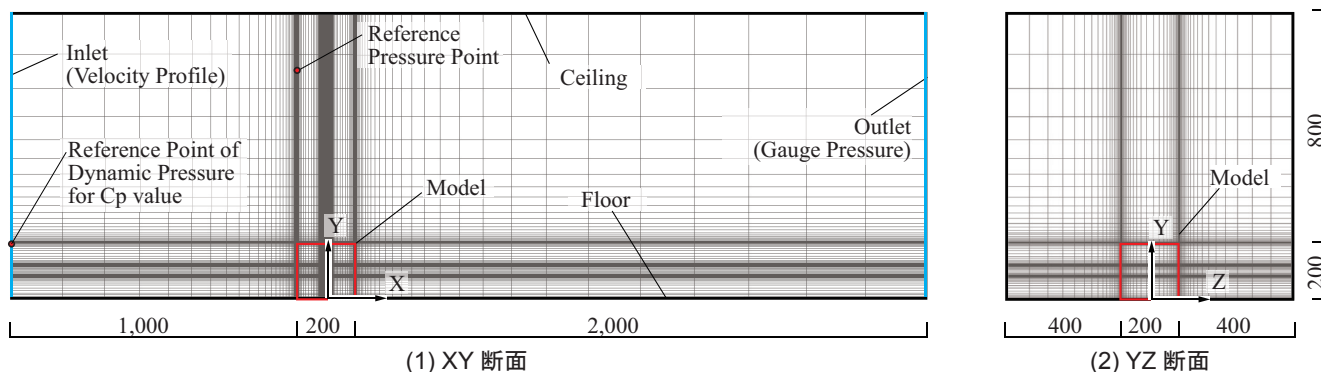


図 1 解析領域及びメッシュレイアウト [mm]

Ventilation Effect of External Wind Turbulence for a Room with Multiple Openings

Part 4. Ventilation Rate for Double-Sided Openings of Small Wind Pressure Difference

FUJITA Takuya, KOBAYASHI Tomohiro, UMEMIYA Noriko

を本計算とした。LESの流入境界はSmirnovら<sup>9)</sup>の手法により変動風を与えた。表2にCFD解析概要を示す。

### 2.3 換気量評価方法

本報ではRANS、LESともにまずは既報<sup>5)</sup>同様、次式で定義されるPFRを用いた換気量評価を行う。

$$PFR = \frac{q_p}{C_p} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \dots(2)$$

PFRは対象領域内で汚染質の希釈・排出に有効な換気空気の流入量で(2)式の $q_p$ は単位時間当たりに対象領域内で発生する汚染物量 $[\text{kg}/\text{s}]$ 、 $C_p$ は対象領域内の平均濃度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ である。RANSでは汚染物を想定した空気と同物性のガスを $1.0 \times 10^{-5} [\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})]$ で室内全域から均一発生させ、室内平均ガス濃度からPFR(RANS)を求めた。LESでは室内で1/2,000[s]ごとに図4に示す座標を組み合わせた27点から粒子を発生( $q_p=54,000 [\text{個}/\text{s}]$ )させて、対

象領域内( $-95 < x < 95, 5 < y < 195, -95 < z < 95$ )の室内粒子個数濃度からPFR(LES)を求めた。PFR(LES)は発生開始後の定常濃度から算出する必要があるが、条件によっては総計算時間が不十分となる可能性を考え、以下の汚染質濃度予測式を用いてCFD解析の個数濃度と予測個数濃度の差の二乗和が最小となるような換気回数 $n [1/\text{s}]$ を同定することでPFR( $=nV$ )を算出した。

$$C_r(t) = \frac{q_p}{nV} (1 - e^{-nt}) \quad [-] \quad \dots(3)$$

$C_r(t)$ は室内個数濃度 $[\text{個}/\text{m}^3]$ 、 $q_p$ は発生量 $[\text{個}/\text{s}]$ 、 $V$ は室容積 $[\text{m}^3]$ 、 $t$ は本計算開始後の時間 $[\text{s}]$ である。

本報ではPFRに加えて開口面法線方向の風速を流入出で区別して積分することで空気の流入出量を評価する。PFRと区別してこの風速ベースの換気量をAFR(Air Flow Rate) $[\text{m}^3/\text{s}]$ と表記する。RANSでは開口面に流入出する法線方向のレイノルズ平均風速に開口面積を乗じて流入出量の平均値としてAFR(RANS)を求めた。LESでは開口に垂直に流入出する瞬時風速のモニター点を各開口で64点ずつ設置し(図5)、両開口からの瞬時流入風量合計 $Q_{in}$ 及び瞬時流出風量合計 $Q_{out}$ を全time stepで求め、それらの時間平均値をAFR(LES)として算出した。

$$AFR(LES) = \left( \frac{|Q_{in}| + |Q_{out}|}{2} \right) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \dots(4)$$

表2 CFD解析における計算条件

| CFD Code                                 |  | Ansys Fluent 15.0                |           |           |               |           |
|--|--|----------------------------------|-----------|-----------|---------------|-----------|
| Turbulence Model                         | Large Eddy Simulation<br>Smagorinsky-Lilly Model ( $C_s=0.1$ ) | SST $k-\omega$ model             |           |           |               |           |
| Algorithm                                | SIMPLE   |                                  |           |           |               |           |
| Discretization Scheme for Advection Term | Central Differencing   | QUICK                            |           |           |               |           |
| Time Step                                | 0.0005 s   |                                  |           |           |               |           |
| Pre-Conditioning Period                  | 2,000 time step (=1.0 s)                                       |                                  |           |           |               |           |
| Main Calculation Period                  | 38,000 time step (=19 s)                                       |                                  |           |           |               |           |
| Boundary Conditions                      | Inlet  | 1/5 Power law (Smirnov's method) |           |           | 1/5 Power law |           |
|  | Outlet   | Gauge Pressure : 0 [Pa]          |           |           |               |           |
| Walls                                    | Two Layer Model of Linear-Log Law                              |                                  |           |           |               |           |
| Total Number of Cells                    | Case0  | Case1                            | Case2     | Case3     | Case4         | Case5     |
|  | 757,253  | 1,072,323                        | 1,100,923 | 1,166,275 | 1,213,571     | 1,207,659 |

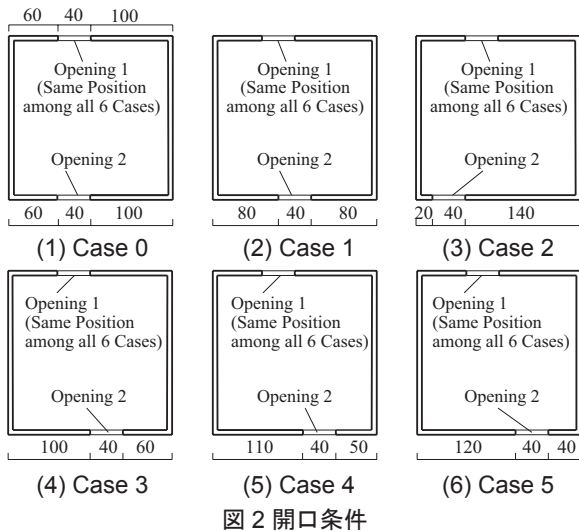


図2 開口条件

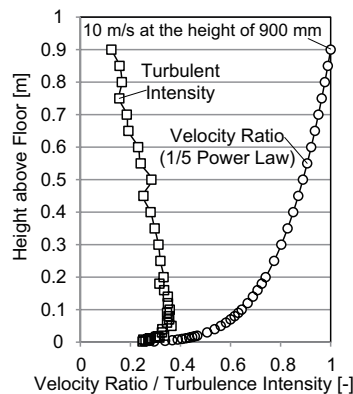


図3 アプローチフローの平均風速及び乱流強度

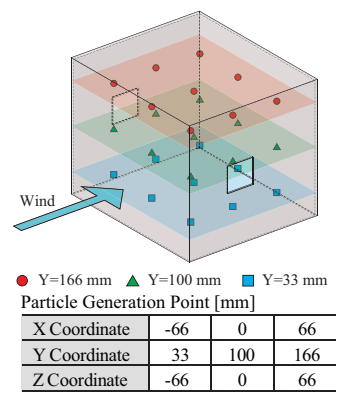


図4 LESにおける粒子発生位置図及び発生位置座標

表1 各条件における開口位置座標および風圧係数値

|        | Central Position of Opening (X, Y, Z) [mm] |                | RANS         |           |              | LES          |           |              |
|--------|--|----------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|
|        |  |                | Cp Value [-] |           | $\Delta C_p$ | Cp Value [-] |           | $\Delta C_p$ |
|        | Opening 1                                  | Opening 2      | Opening 1    | Opening 2 |              | Opening 1    | Opening 2 |              |
| Case 0 | (-20, 100, -99)                            | (20, 100, 99)  | -0.736       | -0.733    | 0.003        | -0.903       | -0.881    | 0.022        |
| Case 1 | (-20, 100, -99)                            | (0, 100, 99)   | -0.736       | -0.710    | 0.026        | -0.903       | -0.842    | 0.061        |
| Case 2 | (-20, 100, -99)                            | (-60, 100, 99) | -0.736       | -0.744    | -0.008       | -0.903       | -0.800    | 0.103        |
| Case 3 | (-20, 100, -99)                            | (20, 100, 99)  | -0.736       | -0.667    | 0.069        | -0.903       | -0.755    | 0.148        |
| Case 4 | (-20, 100, -99)                            | (30, 100, 99)  | -0.736       | -0.635    | 0.101        | -0.903       | -0.691    | 0.212        |
| Case 5 | (-20, 100, -99)                            | (40, 100, 99)  | -0.736       | -0.602    | 0.134        | -0.903       | -0.629    | 0.274        |

### 3. 解析結果と考察

図6にRANSによる $y=100$  [mm]での室内濃度コンターを示す。図7にLESによる室内個数濃度の時間応答のCFD解析結果を(3)式による近似値と共に示す。両者ともCase3～Case5では風圧係数差が大きいほど濃度が低くなる傾向が見られるが、Case0～Case2のように風圧係数差が非常に小さい条件ではその限りではない。よってこれらの条件では、時間平均した風圧係数の差ではなく、開口部周辺の乱流拡散や開口間の瞬時の風圧係数差といった気流の乱れが主な換気駆動力と考えられる。

図8にLESによる $Q_{in}$ と $Q_{out}$ の時間変動を2.0[s]まで示す。全条件で瞬時の風量バランスが取れており、開口部風速モニター点の配置間隔に大きな問題は無いと言える。また、Case2の流入量が他の条件より変動が小さい結果となった。風圧係数差が非常に小さい条件では乱れが主な換気駆動力と考えられることから、Case2では開口部での気流の乱れが小さいため換気効果も小さく、図7の室内汚染物濃度がCase0及びCase1より高くなったと考えられる。図9に各条件のLES結果に基づいて次式から計算された開口2からの流入率( $r_{in(2)}$ )を示す。

$$r_{in(2)} = \left( \frac{Q_{in(2)}}{Q_{in}} \right)^t \times 100 \text{ [%]} \quad \dots(5)$$

$Q_{in(2)}$ は $Q_{in}$ のうち開口2のみから流入する瞬時風量である。Case0では風圧係数差が概ね0であるため、両開口から同程度の風量が流入して50%程度となる。全条件で開口2の風圧係数の方が大きいため、風圧係数差が大きくなるとともに開口部2からの流入率が増加する傾向が見られるが、Case2では50%となり左右の開口からの流入量が同程度となった。このことから、風圧係数差が0.1[-]程度の微小な条件での換気量は開口部近傍の乱れ性状が支配的に影響を及ぼすと言える。

図10に風圧係数差とPFR・AFRの関係を示す。なお、(1)式による換気量( $\alpha=0.60, U=7.40$ (室モデル高さのアプローチフロー))も併せて示す。LESでは風圧係数差が0.1以上でAFR(LES)が(1)式に概ね一致する結果となり、0~0.1程度の風圧係数差

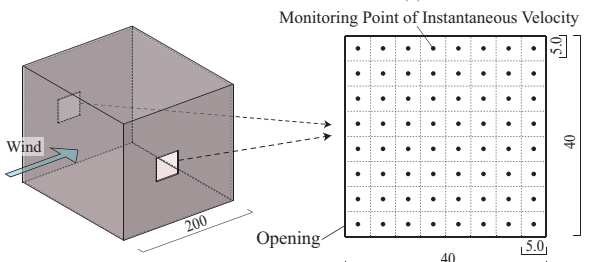


図5 LESにおける開口部z成分風速モニター点位置 [mm]

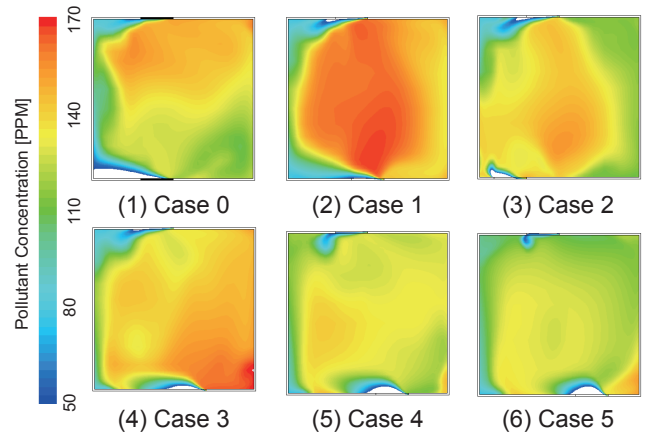


図6 RANSによる室内濃度コンター [PPM]

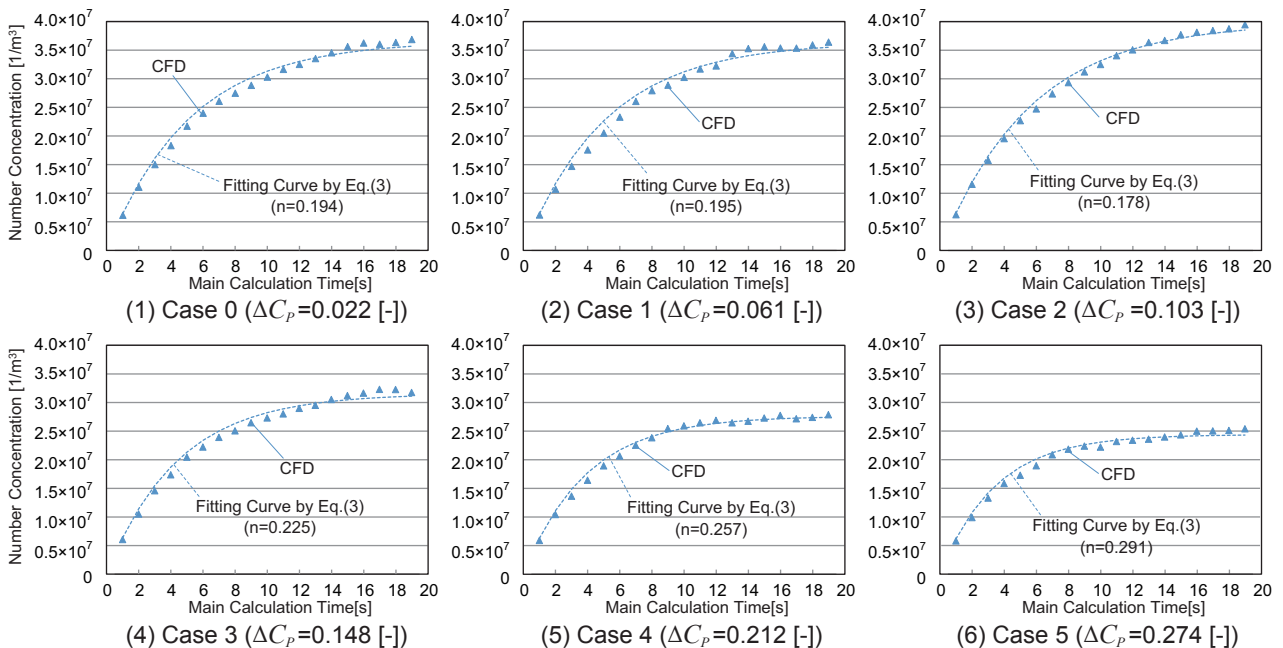


図7 LESによる室内濃度の推移 (CFD結果及び同定したnによる近似曲線)



では乱れ駆動の換気が支配的になるため従来手法による換気量算定では精度が著しく低下することが示された。なお、PFR(LES)はAFR(LES)より若干小さいが、室内での空気の滞留箇所の存在や流出した汚染物の室内への再帰が原因と考えられる。

RANSでは風圧係数差が小さい場合に開口部での移流量が小さいためにAFR・PFR共に(1)式及びLESと比較して極端に小さな結果となった。ただし、ここではRANSとLESで各開口条件の風圧係数差が異なっているため、2種の乱流モデルで気流分布と静圧分布が異なっていると考えられる。したがって、本報のRANS解析ではそもそもの解析精度が十分ではなかったと言えるが、これらの結果からはRANSでは平均風速場と平均圧力場が正しく解かれていたとしても風圧係数差が微小な条件では換気量を適切に評価することができないと考えられる。

#### 4. まとめ

風圧係数差が微小な2開口を対象としてCFDにより換気量を評価した。その結果、風圧係数差が0.1程度以下で従来の式が不適切になると示された。

#### 参考文献

- 1) F. Haghighat, J. Rao, and P. Fazio : The Influence of Turbulent Wind on Air Change Rates - A Modeling Approach, *Building and Environment*, Vol.26, No2, pp.95-109, 1991
- 2) 檜崎正也, 山中俊夫, 樋口祥明 : 風の乱れを考慮した換気設計法に関する研究 第1報 風の乱れによる換気効果とそのメカニズム, *空気調和・衛生工学会論文集*, pp25-34, 1989.2
- 3) 山中俊夫, 檜崎正也, 岩本清孝 : 自然風の乱れによる換気効果 (その31) 大小二つの開口を持つ室の風の乱れによる換気効果, *日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)*, pp819-820, 1993.9
- 4) 河野良坪, 加藤信介, 大岡龍三, 高橋岳生 : 欧風時における片側開口居室の換気量予測 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3), *日本建築学会環境系論文集 第73巻 第626号*, pp437-443, 2008.4
- 5) 小林知広, 梅宮典子, 近本智行, LIM Eunsu : 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2) LESによる単一開口と対面開口の比較, *日本建築学会大会学術講演梗概集, D2*, pp.601-602, 2015.9
- 6) 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
- 7) M. Sandberg and D. Etheridge : BUILDING VENTILATION - Theory and Measurement, John Wiley & Sons Ltd, 1996
- 8) 小林知広, 梅宮典子, 近本智行, LIM Eunsu : 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1) LESを用いた単一及び対面開口の比較, *日本建築学会近畿支部研究報告集*, 第55号・環境系, pp.397-400, 2015.6
- 9) A. Smirnov, et al : Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.123, Issue2, pp359-371, 2001.6

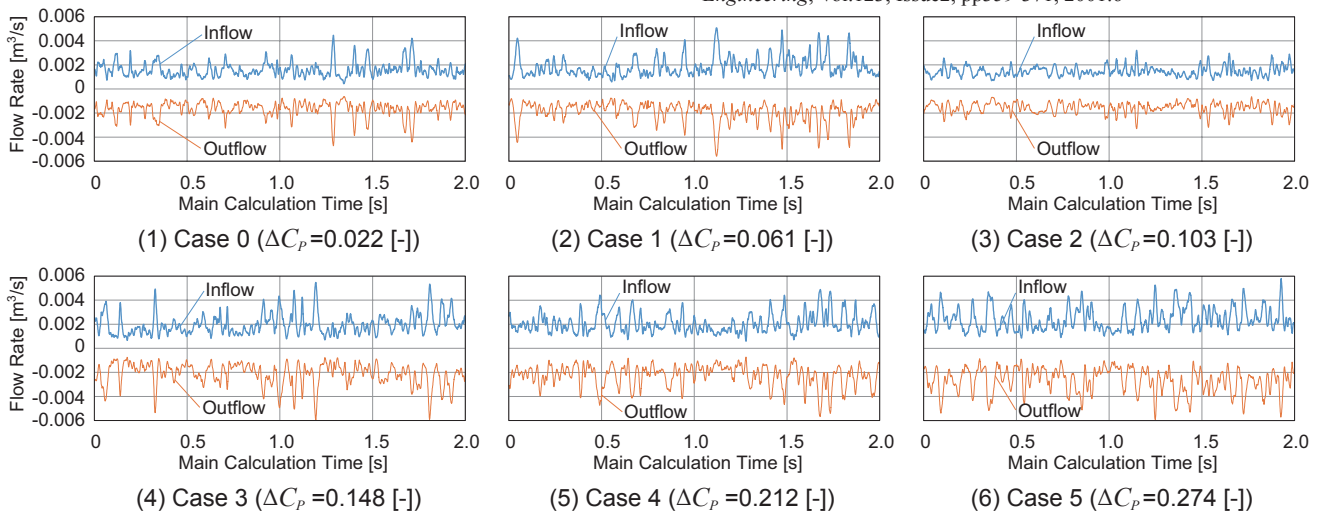


図8 LESによる開口面に流入する風量の時間変動

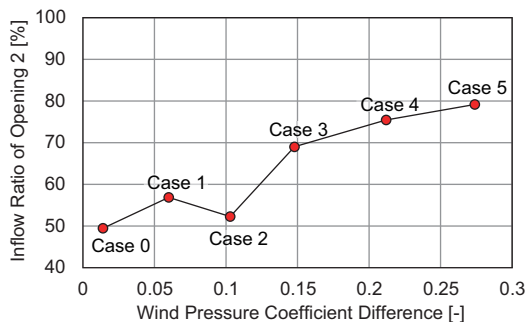


図9 風圧係数差と流入率の関係

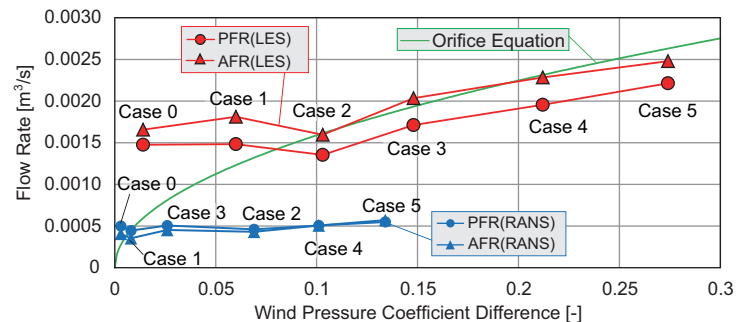


図10 風圧係数差と換気量の関係

\* 1 大阪市立大学工学部建築学科 学部生  
 \* 2 大阪市立大学大学院工学研究科 講師 博士 (工学)  
 \* 3 大阪市立大学大学院工学研究科 教授 博士 (工学)

Undergraduate Student, Department of Architecture, Faculty of Eng., Osaka City University  
 Lecturer, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr. Eng.  
 Professor, Department of Urban Eng., Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr. Eng.