

複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究
 (その5) 微小な風圧係数差での換気量簡易予測

Ventilation Effect of External Wind Turbulence for a Room with Multiple Openings
 (Part 5) Simplified Prediction Method of Flow Rate for Small Wind Pressure Difference

学生会員 ○藤田 拓也 (大阪市立大学) 正会員 小林 知広 (大阪市立大学) 正会員 梅宮 典子 (大阪市立大学)

Takuya FUJITA*¹ Tomohiro KOBAYASHI*¹ Noriko UMEMIYA*¹

*¹ Osaka City University

General prediction method of wind-induced ventilation rate cannot work well for a room with multiple openings of the same order of magnitude of time-averaged wind pressure coefficient (C_p value), because influence of the wind turbulence cannot be considered. This work aims to evaluate ventilation performance due to turbulence. This paper presents the flow rate of a room with two openings for several cases of small wind pressure difference by using LES. The flow rate is evaluated based on the instantaneous velocity at the opening, and a simplified prediction method of the flow rate is shown.

1. はじめに

2 開口を有する室の風力換気量は、一般的に有効開口面積の結合値と風圧係数差を換気の式に適用することで算定される。この式では風圧係数差を換気駆動力とみなすため単一開口の換気量は算定できず、0 と見なさざるを得ない。また、2 開口でも開口間に風圧係数差がない条件では換気量が 0 となるが、実際には風の乱れで換気が行われると考えられる。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 種と言われており^{1,2)}、複数開口でも同様に脈動と混合のメカニズムで換気が行われる³⁾。乱れの換気効果の既往研究は特に単一開口を扱ったものが多く、山中ら⁴⁾、河野・加藤ら⁵⁾による例も見られるが、複数開口で風圧係数差が微小な場合での換気効果は未だ不明な点も多い。筆者らは前報⁶⁾で微小な風圧係数差の対面 2 開口条件を対象として LES を用いた CFD 解析を行い、濃度に基づく換気量である Purging Flow Rate (PFR) と開口部風速に基づく通気量である Air Flow Rate (AFR) により換気量の評価を行い、風圧係数差が 0.1 [-] 程度以下では一般的な換気の式の精度が大きく低下し、気

流の乱れが主な駆動力となる換気が行われていることを明らかにした。また、この風圧係数差の範囲においては、風圧係数差の標準偏差が換気量に大きな影響を及ぼす可能性があることを示した。本報では片面 2 開口条件を加えて換気量を AFR で評価し、対面開口条件との比較を行うとともに風圧係数差が微小な条件での換気量の簡易予測手法の検討を行う。

2. 解析概要

2.1 解析対象及び解析条件

風洞での縮小模型実験を模した CFD 解析を行った。解析領域は幅、高さ、長さがそれぞれ 1,000、1,000、3,200 mm の流路とし、40 × 40 mm の開口を 2 つ有する一辺 200 mm、壁厚 2.0 mm の立方体を室モデル(室容積 0.0076 [m³])として設置した。Fig.1 に解析領域及びメッシュレイアウトを示す。2 開口の設置面の条件は風上側から見て左側の面に 2 つ (SS-L)、前面に 2 つ (SS-F)、後面に 2 つ (SS-B) の 3 種を解析し、既往の研究で評価した側面 1 開口ずつの対面 2 開口 (DS) を加えた計 4 種とした (Fig.2)。全条件で開口部中心高さは 100 [mm] とした。開口設置面に関する条件は上記の 4 種としたが、多くの風圧係数差とその標準

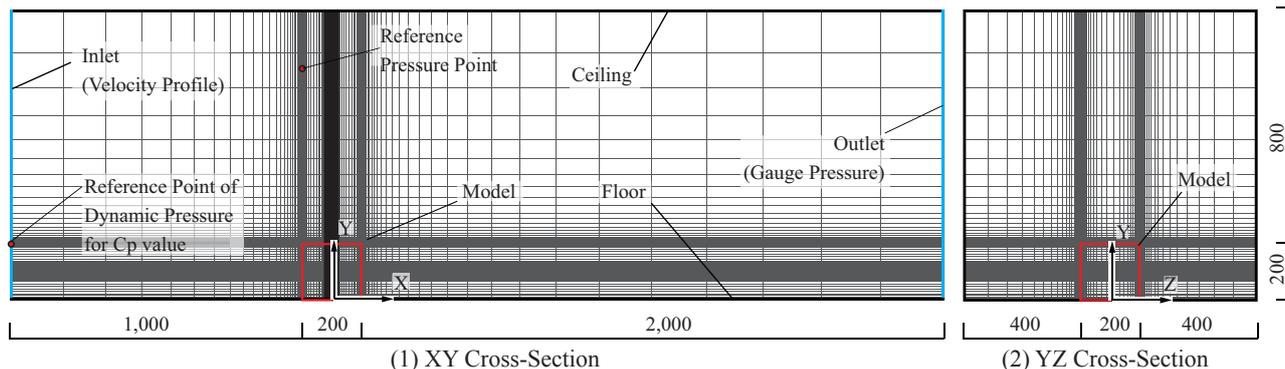


Fig.1 Computational Domain and Mesh Layout

偏差の条件下で換気量を評価するため、開口の座標を水平方向に変更して配置条件 DS において 10 条件、SS-L では 6 条件、SS-F 及び SS-B では各 3 条件を設定し、解析条件は計 22 条件とした。これらの条件を Table 1 にまとめて示す。なお、同表には開口が無い解析⁷⁾から得られた開口中心間の風圧係数の差 (ΔC_p) と後述する解析結果も併せて記載している。

2.2 CFD 解析手法

LES による CFD 解析を行う。LES ではまず標準 $k-\epsilon$ モデル (SKE) を用いた解析を行い、その結果を初期条件として LES の計算を開始した。計算時間間隔は 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てその後の 19 [s] を本計算とした。なお、LES の流入境界は Fig.3 に示す 1/5 べき乗則の境界層流に Smirnov ら⁸⁾ の手法を適用して作成した変動風を与えた。Table 2 に CFD 解析概要をまとめて示す。

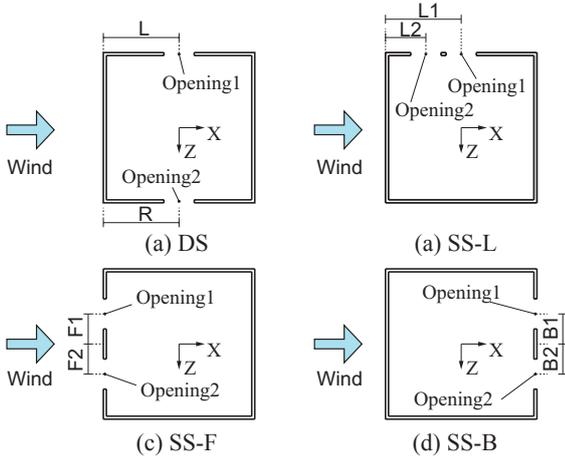


Fig.2 Studied Cases of Opening Condition

2.3 換気量評価方法

本報では開口面法線方向の瞬時風速を流入出で区別して積分することで瞬時流入出風量を評価する。開口に垂直に流入出する成分の瞬時風速のモニター点を各開口で 64 点ずつ設置し (Fig.4)、両開口からの瞬時流入風量 Q_{in} 及び瞬時流出風量 Q_{out} をそれぞれ

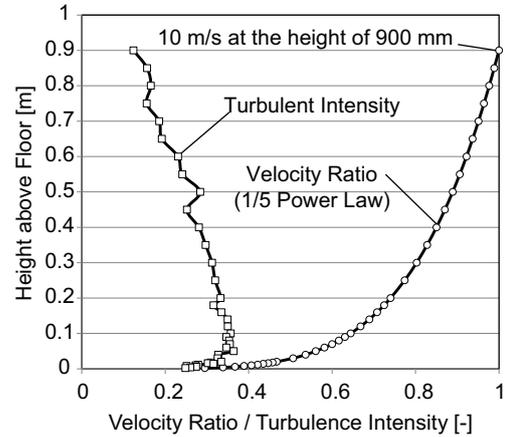


Fig.3 Velocity and Turbulent Intensity Profile of Approaching Flow

Table 2 Summary of CFD Analysis

Turbulence Model		Large Eddy Simulation			
CFD Code		Fluent 15.0			
Algorithm		Implicit method(SIMPLE)			
Discretization Scheme for Advection Term		Central Differencing			
Time Step		0.0005 [s]			
Transition Term		2,000 time step (=1.0 [s])			
Boundary Condition	Inlet	1/5 Power law(Smirnov's method)			
	Outlet	Gauge Pressure : 0 [Pa]			
	Walls	Two Layer Model of Linear-Log Law			
Total Number of Cells	SS-L	CaseL-A	1,409,229	1,433,465	1,457,701
		CaseL-D	1,506,173	1,524,350	1,560,704
		CaseL-E	1,506,173	1,524,350	1,560,704
	SS-F	CaseF-A	1,526,425	1,362,560	1,369,615
		CaseF-B	1,526,425	1,362,560	1,369,615
	SS-B	CaseB-A	1,526,425	1,362,560	1,369,615

Table 1 Studied Cases and Results Obtained from CFD

Description	Case	Central Position of Opening (X,Y,Z) [mm]				ΔC_p [-]	$\sigma_{\Delta C_p}$ [-]	Q_{CFD} [m ³ /s]	Q_{Pre} [m ³ /s]	
		Opening1		Opening2					Daish et al.	Present Paper
DS	Case0	L=100	(0,100,-100)	R=100	(0,100,100)	0.000	0.30435	0.00186	0.001360	0.001720
	Case0-1	L=80	(-20,100,-100)	R=80	(-20,100,100)	0.000	0.29861	0.00166	0.001348	0.001711
	Case0-2	L=60	(-40,100,-100)	R=60	(-40,100,100)	0.000	0.29117	0.00148	0.001331	0.001680
	Case0-3	L=120	(20,100,-100)	R=120	(20,100,100)	0.000	0.32730	0.00205	0.001411	0.001750
	Case0-4	L=140	(40,100,-100)	R=140	(40,100,100)	0.000	0.34661	0.00226	0.001452	0.001750
	Case1	L=80	(-20,100,-100)	R=100	(0,100,100)	0.039	0.32315	0.00181	0.001709	0.001816
	Case2	L=80	(-20,100,-100)	R=40	(-60,100,100)	0.110	0.30294	0.00160	0.002141	0.001839
	Case3	L=80	(-20,100,-100)	R=120	(20,100,100)	0.124	0.37457	0.00203	0.002313	0.002013
	Case4	L=80	(-20,100,-100)	R=130	(30,100,100)	0.190	0.37457	0.00228	0.002644	0.002076
	Case5	L=80	(-20,100,-100)	R=140	(40,100,100)	0.256	0.39931	0.00248	0.002963	0.002176
SS-L	CaseL-A	L1=100	(0,100,-100)	L2=55	(-45,100,-100)	0.021	0.33532	0.00169	0.001600	0.001811
	CaseL-B	L1=100	(0,100,-100)	L2=50	(-50,100,-100)	0.040	0.34783	0.00164	0.001763	0.001859
	CaseL-C	L1=100	(0,100,-100)	L2=45	(-55,100,-100)	0.058	0.34783	0.00169	0.001886	0.001876
	CaseL-D	L1=100	(0,100,-100)	L2=40	(-60,100,-100)	0.076	0.32949	0.00166	0.001973	0.001855
	CaseL-E	L1=100	(0,100,-100)	L2=35	(-65,100,-100)	0.096	0.32949	0.00169	0.002095	0.001880
	CaseL-F	L1=100	(0,100,-100)	L2=30	(-70,100,-100)	0.114	0.31512	0.00171	0.002179	0.001886
SS-F	CaseF-A	F1=40	(-100,100,-40)	F2=40	(-100,100,40)	0.000	0.12604	0.00143	0.000875	0.001305
	CaseF-B	F1=30	(-100,100,-30)	F2=30	(-100,100,30)	0.000	0.08666	0.00132	0.000726	0.001108
	CaseF-C	F1=50	(-100,100,-50)	F2=50	(-100,100,50)	0.000	0.14915	0.00151	0.000952	0.001433
SS-B	CaseB-A	B1=40	(100,100,-40)	B2=40	(100,100,40)	0.000	0.12000	0.00102	0.000854	0.001163
	CaseB-B	B1=30	(100,100,-30)	B2=30	(100,100,30)	0.000	0.08355	0.00098	0.000713	0.001002
	CaseB-C	B1=50	(100,100,-50)	B2=150	(100,100,50)	0.000	0.14729	0.00108	0.000946	0.001270

れ求めた。その平均値を瞬時の通気量 Air Flow Rate (AFR) [m³/s] とし、それを全 time step で時間平均することとし、(1) 式により各条件の AFR を算出した。

$$AFR(LES) = \left(\frac{|Q_{in}| + |Q_{out}|}{2} \right) \quad \dots(1)$$

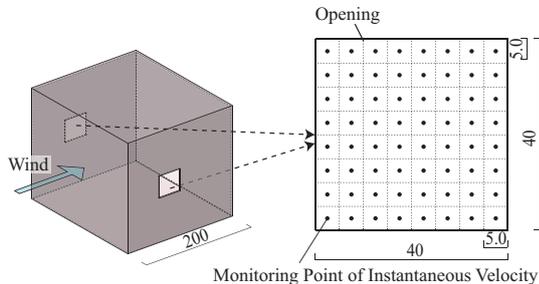


Fig. 4 Monitoring Points for Instantaneous Velocity

3. 換気量及び風圧係数差変動の評価

3.1 解析結果と考察

Fig.5 に CaseL-A における瞬時の流入出風量の時間変動を本計算開始後 2 [s] 間について示す。この結果から、瞬時流入出風量のバランスは概ね取れており、風速モニター点の配置間隔に大きな問題はないと言える。前述の Table 1 には開口なしの室モデル解析⁷⁾ から得られた各条件における開口中心位置の風圧係数差の標準偏差を $\sigma_{\Delta C_p}$ として示すとともに、各条件で得られた AFR の算定結果をまとめて示している。また、以降、開口配置条件ごとに結果と考察を記す。

3.2 各条件における AFR と風圧係数差・標準偏差

Case0-0 ~ Case0-4 の 5 条件では開口配置が左右対称であるため ΔC_p は 0 としており、平均的な風力換気駆動力はないにも関わらず 0.00166 ~ 0.00226 [m³/s] の AFR が得られている。これを室容積で除すと 0.2 ~ 0.3 [1/s] 程度の換気回数である。一方 $\sigma_{\Delta C_p}$ に着目すると概ね 0.3 程度となっており、時間平均した ΔC_p が 0 であっても流入出開口が時間的に入れ替わる 2 開口間の脈動現象により換気が行われると言える。このため、風圧係数差の標準偏差である $\sigma_{\Delta C_p}$ は

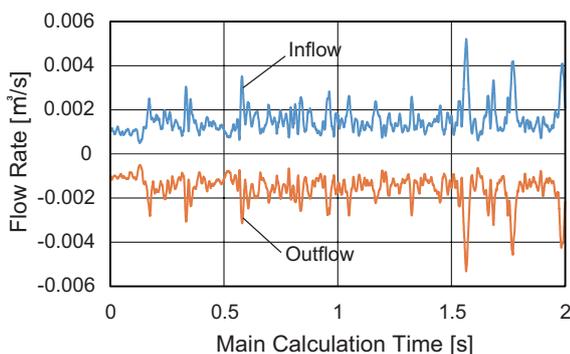


Fig.5 Instantaneous Inflow/Outflow Rate passing through Two Openings (CaseL-A)

ΔC_p が小さな条件における換気量予測の重要なパラメータになる可能性がある。同じく対面開口で、開口 1 の座標を固定して他方を変更することで比較的小さな ΔC_p の値となる Case 1 ~ Case 5 を見ても同様に $\sigma_{\Delta C_p}$ が大きな場合に AFR が大きくなる傾向が得られた。Fig.6 に各開口条件における風圧係数差の標準偏差 $\sigma_{\Delta C_p}$ と AFR の関係を示すが、この結果からも対面開口 (DS) 条件における $\sigma_{\Delta C_p}$ と AFR の関係がわかる。

次に前面 2 開口条件 (SS-F) と後面 2 開口条件 (SS-B) の結果に着目する。これらは開口が左右対称配置であるため全て ΔC_p を 0 としたが、それぞれの開口配置条件において緩やかではあるが $\sigma_{\Delta C_p}$ と AFR に正の相関が見られる。ただし、両配置条件を比較すると ΔC_p は 0 かつ $\sigma_{\Delta C_p}$ の値も同程度であるにも関わらず、異なる AFR の値が得られた。前述の乱れの換気メカニズムを考えると、脈動を示す開口間風圧差の変動は同程度であるが、開口部付近での混合性状が大きく異なると言える。開口部の混合による単一開口換気を取り扱った研究例⁴⁾ では、換気量は開口面積とその近傍風速に比例することが示されているが、SS-F 条件では高風速の気流が衝突する領域、SS-B 条件では比較的低風速が複雑な気流を構成する後流域に開口が配置されており、平均風速・乱流特性が全く異なる条件であるため混合による換気量の違いが大きな要因と推察される。このことから、開口付近での乱流拡散も換気に大きく寄与していると考えられ、換気量予測にあたっては脈動成分と混合成分の両者の影響を組み込むことが実現象に基づくモデル化という意味で好ましいと考えられる。

これらを踏まえて SS-L 条件の結果を見ると、全条件で ΔC_p が 0.12 以下で微小な風圧係数差であるため AFR は ΔC_p には依存せず、脈動に関連する $\sigma_{\Delta C_p}$ が同程度かつ混合に関わる壁面近傍風速も大きな差がないため結果的に同程度の AFR になったと解釈できる。

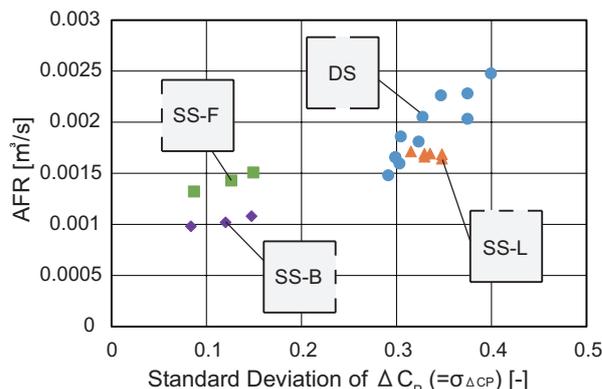


Fig.6 Correlation between Standard Deviation of ΔC_p and AFR

4. 乱れによる換気量予測式の検討

乱れによる換気の既往研究として、近年 Daish ら⁹⁾ は片面 2 開口で以下の予測式を提案している。

$$Q_{pre} = \overline{AV}_1 \sqrt{a \cdot \Delta C_p + b \cdot \sigma_{\Delta C_p}} \quad \dots(2)$$

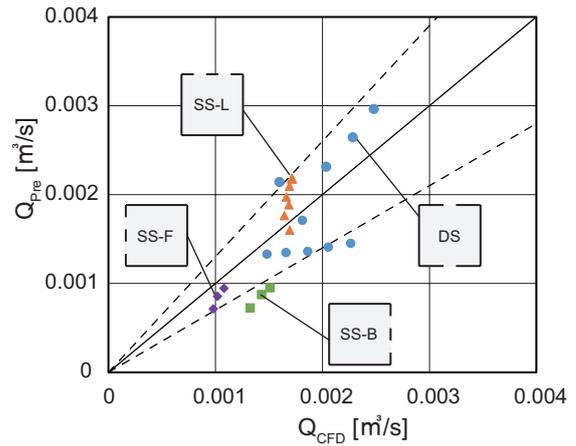
上式は風圧係数差に係数を乗じて重みを軽くするとともに、風圧係数の標準偏差 $\sigma_{\Delta C_p}$ に着目して予測式に組み込んでいる。係数 a, b はそれぞれ 0.343, 0.084 が提案されている。本研究で設定した各条件の換気量をこの式で予測した Q_{pre} と、真値とみなす LES の AFR である Q_{CFD} の関係を Fig.7 (a) に示す。 V_1 は風圧係数の基準風速である室モデル軒高風速を採用した。なお、破線は誤差 30% の範囲を表す。この式でもある程度の精度で換気量は予測されるが、SS-B と SS-F のように ΔC_p が微小かつ $\sigma_{\Delta C_p}$ が同程度ながら開口部の混合性状に違いがある場合の換気量の差異が評価できず、結果的に SS-B で精度が低い。筆者らは前述の通り乱れの換気メカニズムから脈動と開口部での混合の両者を評価する必要があると考え、次式のように混合の影響も組み込んだ予測式を提案する。

$$Q_{pre} = \alpha \overline{AV}_1 \sqrt{a \cdot \Delta C_p + b \cdot \sigma_{\Delta C_p}} + c \cdot \sum AV_2 \quad \dots(3)$$

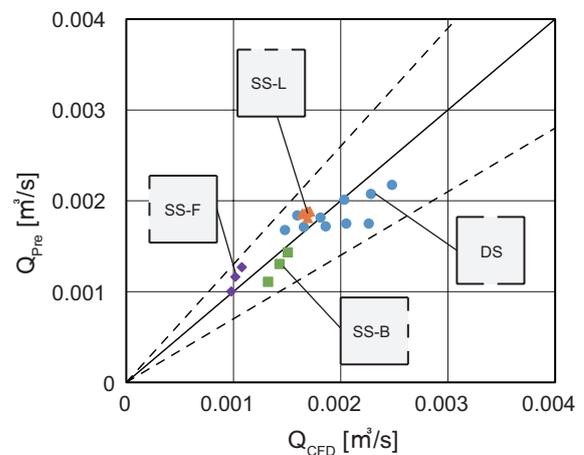
ここでは $\sigma_{\Delta C_p}$ を含む項は瞬時の通風と捉えて有効開口面積の直列結合値に乘じる平方根中に含む。一方混合成分は山中ら⁴⁾ や筆者ら⁷⁾ の研究から、開口部単体で生じる換気として表現することで実現象に基づく予測式を意図した。なお、 V_2 は開口を有さない室モデルの LES 解析結果⁷⁾ における開口中心想定位置から法線方向に 20mm 離れた位置の壁面近傍スカラー風速の時間平均値を採用した。各係数は最小二乗法により小数点以下 3 桁で同定を行った。Fig.7 (b) に同定結果 ($a=0.149, b=0.262, c=0.053$) に基づき予測した換気量 Q_{pre} と解析値 Q_{CFD} の関係を示す。全条件において誤差 30% 以内に収まり (2) 式よりも精度が向上した。また、混合性状が異なる SS-F と SS-B の換気量の違いが予測結果に反映されている。さらに、 ΔC_p に違いはあるものの全て 0.1 程度以下の微小な値で、 $\sigma_{\Delta C_p}$ と開口部近傍風速の両者が同程度の SS-L 条件では、 Q_{pre} は Q_{CFD} と同様に一定の値を取り、より高精度で換気量が予測されることが示された。

5. まとめ

本報では微小な風圧係数差の 2 開口で換気量評価を行い、開口中心における風圧係数差の標準偏差と開口部壁面近傍風速が換気量に影響を及ぼすことを示した。また、微小な風圧係数差の条件を対象として両者を組み込んだ換気量の簡易予測式を提案した。



(a) Daish et al.



(b) Present Paper

Fig.7 Correlation between Analysis and Prediction Value

参考文献

- 1) F. Haghghat, 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) F. Haghghat, H. Brohus, and J. Rao : Modelling air infiltration due to wind fluctuations - a review, *Building and Environment*, Vol.35, pp.377-385, 2000
- 3) 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
- 4) T. Yamanaka, H. Kotani, K. Iwamoto, and M. Kato : Natural, Wind-Forced Ventilation caused by Turbulence in a Room with a Single Opening, *International Journal of Ventilation*, Vol. 5, No.1, pp.179-187, 2006.6
- 5) 河野良坪, 加藤信介, 大岡龍三, 高橋岳生: 横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
- 6) 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風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 2 開口を有する室の換気量評価, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 第 4 巻, pp.105-108, 2016.9
- 7) 小林知広, 梅宮典子, 近本智行, LIM Eunsu : 複数の開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究 (その 2) LES による単一開口及び複数開口の解析, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 第 4 巻, pp.201-204, 2015.9
- 8) A. Smirnov, S. Shi, I. Celik : Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.123, Issue2, pp359-371, 2001.6
- 9) N. C. Daish, G. Carrilho da Graça, P.F. Linden, D. Banks : Impact of aperture separation on wind-driven single-sided natural ventilation, *Building and Environment*, Vol.108, pp.122-134, 2016. 11