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 8）微小な風圧係数差での換気量の簡易予測手法の検討

気流の乱れ　換気量　LES
CFD　PFR　風圧係数

正会員　○藤田拓也 *1
同　小林知広 *2
同　梅宮典子 *3

1. はじめに

2 開口の風力換気量は一般に有効開口面積 αA の結合値と風圧係数差を用いて以下のオリフィス式により算定される。

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\alpha_1 A_1)^2} + \frac{1}{(\alpha_2 A_2)^2}}} V\sqrt{C_1 - C_2} \ [\mathrm{m^3/s}] \qquad ...(1)$$

ここで C は開口の風圧係数 [-] で、V は風圧係数の基準風速 [m/s] であり、一般に時間平均の評価である。この手法では時間平均の風圧係数に差がない条件では換気駆動力が無いため換気量が 0 とみなされる。また、単一開口でも換気量算定ができないが、実際には乱れにより換気される。乱れによる換気のメカニズムは単一開口では室内空気の圧縮性による脈動現象（Pulsation Flow）と開口部での乱流拡散による混合現象（Eddy Flow）の 2 種があり [1]、複数開口でも風圧変動により流入出方向が変化する脈動 [2] と混合で換気が行われる。単一開口を扱った研究はこれまでにも例が見られるが [3-5]、2 開口で風圧係数差が微小な場合での換気量算定には未だ不明な点も多い。筆者らは既報 [6] で微小な風圧係数差の対面開口条件を対象に LES を行い、濃度に基づく実質的な換気量（Purging Flow Rate, PFR）と開口部風速に基づく通気量（Air Flow Rate, AFR）を評価することで、風圧係数差が 0.1 程度以下ではオリフィス式の精度が低下し、乱れが主な換気の要因であることを示した。本報では同様に LES を用いた CFD 解析で対象モデルの開口条件を増やすことで風圧係数差の範囲を広げ、乱れが換気の主な要因となる場合の換気量を決定するパラメータに関する検討を行う。また、乱れを表すパラメータを用いて簡易的に換気量を算定する手法の検討を行う。

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 mm、1,000 mm、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 m^3）として設置した。**図 1** に解析領域及びメッシュレイアウトの一例を示す。2 開口の設置面の条件は風上側から見て左側面に 2 つ (Case SS-L)、風上面に 2 つ (Case SS-F)、風下面に 2 つ (Case 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 (Case DS) を加えた計 4 種とした（**図 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風圧変動の条件下で換気量を評価するため、開口の位置を水平方向に変更して Case DS におい

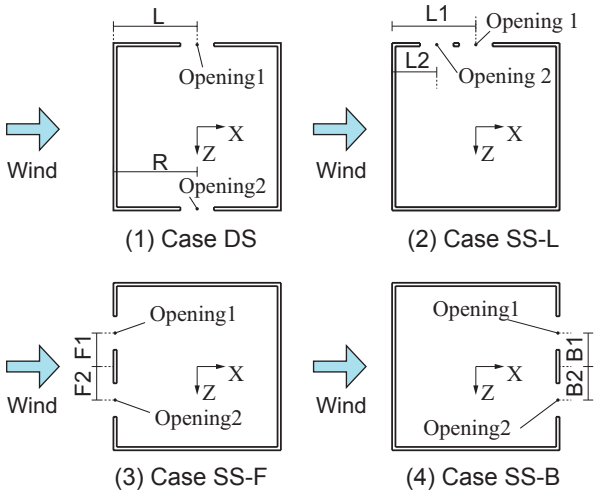
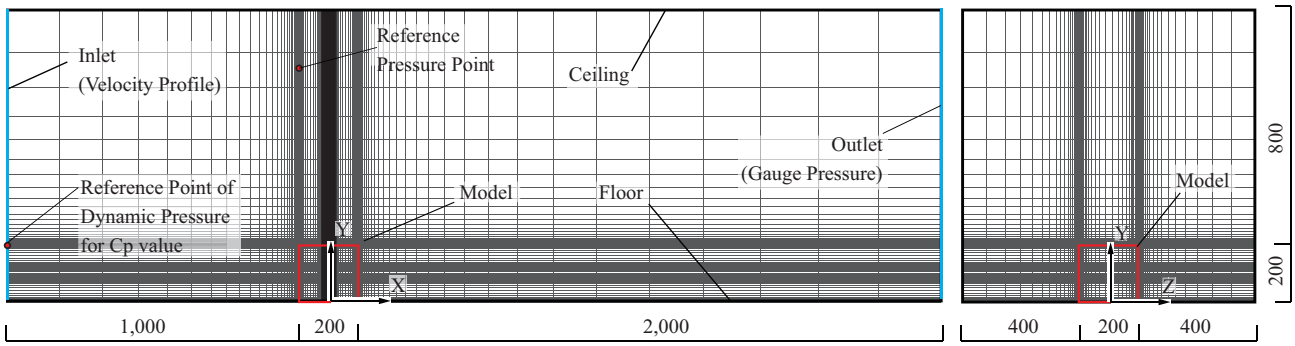


図 2　開口条件



(1) XY 断面　(2) YZ 断面

図 1　解析領域およびメッシュレイアウト

Ventilation Effect of External Wind Turbulence for a Room with Multiple Openings
Part 8. Simplified Prediction Method of Flow Rate for Small Wind Pressure Difference

FUJITA Takuya, KOBAYASHI Tomohiro, UMEMIYA Noriko

て既報[6]の解析条件に5条件を加えた10条件、Case SS-Lでは6条件、Case SS-F及びSS-Bでは各3条件を設定し、計22条件を解析条件とした。これらの条件を**表1**にまとめて示す。なお、同表には開口の無いシールドモデルのLES[7]から得られた2開口の中心位置間における風圧係数の差(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解析を行うこととし、まず標準k-εモデルを用いた解析を行った。その後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LESへの移行期間とみなして結果を破棄し、その後の19 sを本計算とみなした。なお、LESの流入境界は**図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。**表2**にCFD解析概要をまとめて示す。

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**図4**に示すよう64点ずつ設置し、両開口からの瞬時流入風量Q_{in}及び瞬時流出風量Q_{out}をそれぞれ求めた。その絶対値の平均を瞬時の通気量とし、さらにそれを全time stepで時間平均して(2)式によりAFR [m^3/s]として算出する。

$$AFR\ (Q_{CFD}) = \overline{\left(\frac{|Q_{in}| + |Q_{out}|}{2}\right)}^{t}\ [\mathrm{m^3/s}] \qquad ...(2)$$

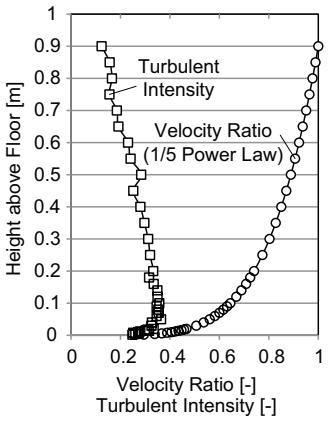


図3 アプローチフローの平均風速及び乱流強度

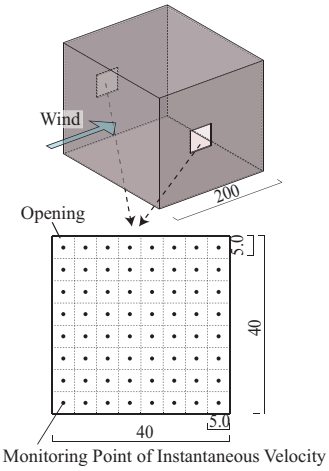


図4 瞬時風速モニター点

3. 換気量の評価

図5にCase DS 0-0における瞬時の流入出風量の時間変動を本計算開始後2.0 s間について示す。この結果から、瞬時流入出の風量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**表1**にはシールドモデルの解析[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$\sigma_{\Delta Cp}$として示すとともに、各条件で得られたAFR (Q_{CFD})の算定結果をまとめて示している。以降、開口配置条件ごとに結果と考察を記す。Case DS 0-0 ~ 0-4の5条件では開口配置が左右対称であるためΔC_Pは0とみなしており、時間平均の風圧係数で考えた場合には換気駆動力はないにも関わら

表2 CFD解析における計算条件

Turbulence Model		Large Eddy Simulation		
CFD Code		Fluent 15.0		
Algorithm		Implicit Method(SIMPLE)		
Discretization Scheme for Advective Term		Central Differencing		
Time Step		0.0005 [s]		
Transition Term		2,000 time step (=1.0 [s])		
Main Calculation Term		38,000 time step (=19.0 [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	DS	DS 0-0 728,613	DS 0-1 757,253	
		DS 0-2 728,613	DS 0-3 728,613	DS 0-4 728,613
	SS-L	SS-L 1 1,409,229	SS-L 2 1,433,465	SS-L 3 1,457,701
		SS-L 4 1,506,173	SS-L 5 1,524,350	SS-L 6 1,560,704
	SS-F	SS-F 1 1,526,425	SS-F 2 1,362,560	SS-F 3 1,369,615
	SS-B	SS-F 4 1,526,425	SS-F 5 1,362,560	SS-F 6 1,369,615

表1 開口条件と解析結果

Description	Case	Central Position of Opening (X,Y,Z) [mm]				ΔCp [-]	$\sigma_{\Delta Cp}$ [-]	V_2 [m/s]		AFR (Q_{CFD})[m^3/s]	AFR (Q_{Pre}) [m^3/s]	
		Opening 1		Opening 2				Opening 1	Opening 2		Daish et al.	Present paper
Wind DS	DS 0-0	L=100	(0,100,-100)	R=100	(0,100,100)	0.000	0.304	1.627	1.653	0.001861	0.001360	0.001720
	DS 0-1	L=80	(-20,100,-100)	R=80	(-20,100,100)	0.000	0.299	1.661	1.680	0.001657	0.001348	0.001711
	DS 0-2	L=60	(-40,100,-100)	R=60	(-40,100,100)	0.000	0.291	1.599	1.579	0.001481	0.001331	0.001680
	DS 0-3	L=120	(20,100,-100)	R=120	(20,100,100)	0.000	0.327	1.491	1.518	0.002054	0.001411	0.001750
	DS 0-4	L=140	(40,100,-100)	R=140	(40,100,100)	0.000	0.347	1.241	1.255	0.002263	0.001452	0.001750
	DS 1	L=80	(-20,100,-100)	R=100	(0,100,100)	0.039	0.323	1.661	1.653	0.001812	0.001709	0.001816
	DS 2	L=80	(-20,100,-100)	R=40	(-60,100,100)	0.110	0.303	1.661	1.385	0.001596	0.002141	0.001839
	DS 3	L=80	(-20,100,-100)	R=120	(20,100,100)	0.124	0.375	1.661	1.518	0.002034	0.002313	0.002013
	DS 4	L=80	(-20,100,-100)	R=130	(30,100,100)	0.190	0.375	1.661	1.409	0.002283	0.002644	0.002076
	DS 5	L=80	(-20,100,-100)	R=140	(40,100,100)	0.256	0.399	1.661	1.255	0.002479	0.002963	0.002176
Wind SS-L	SS-L 1	L1=100	(0,100,-100)	L2=55	(-45,100,-100)	0.021	0.335	1.627	1.575	0.001693	0.001600	0.001811
	SS-L 2	L1=100	(0,100,-100)	L2=50	(-50,100,-100)	0.040	0.348	1.627	1.532	0.001643	0.001763	0.001859
	SS-L 3	L1=100	(0,100,-100)	L2=45	(-55,100,-100)	0.058	0.348	1.627	1.477	0.001687	0.001886	0.001876
	SS-L 4	L1=100	(0,100,-100)	L2=40	(-60,100,-100)	0.076	0.329	1.627	1.437	0.001662	0.001973	0.001855
	SS-L 5	L1=100	(0,100,-100)	L2=35	(-65,100,-100)	0.096	0.329	1.627	1.444	0.001691	0.002095	0.001880
	SS-L 6	L1=100	(0,100,-100)	L2=30	(-70,100,-100)	0.114	0.315	1.627	1.615	0.001713	0.002179	0.001886
Wind SS-F	SS-F 1	F1=40	(-100,100,-40)	F2=40	(-100,100,40)	0.000	0.126	2.236	2.213	0.001430	0.000875	0.001305
	SS-F 2	F1=30	(-100,100,-30)	F2=30	(-100,100,30)	0.000	0.087	2.005	1.993	0.001323	0.000726	0.001108
	SS-F 3	F1=50	(-100,100,-50)	F2=50	(-100,100,50)	0.000	0.149	2.517	2.485	0.001508	0.000952	0.001433
Wind SS-B	SS-B 1	B1=40	(100,100,-40)	B2=40	(100,100,40)	0.000	0.120	1.517	1.520	0.001019	0.000854	0.001163
	SS-B 2	B1=30	(100,100,-30)	B2=30	(100,100,30)	0.000	0.084	1.455	1.458	0.000980	0.000713	0.001002
	SS-B 3	B1=50	(100,100,-50)	B2=150	(100,100,50)	0.000	0.147	1.573	1.579	0.001079	0.000946	0.001270

ず 0.00148 ～ 0.00226 [m^3/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 $\sigma_{\Delta Cp}$ に着目すると概ね 0.3 程度となっており、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、瞬時の風圧係数差の標準偏差である $\sigma_{\Delta Cp}$ は 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 DS 1 ～ DS 5 を見ても同様に $\sigma_{\Delta Cp}$ が大きな場合に AFR が大きくなる傾向が得られた。**図 6** に各開口条件における $\sigma_{\Delta Cp}$ 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 $\sigma_{\Delta Cp}$ と AFR の関係がわかる。

次に風上面 2 開口（Case SS-F）と風下面 2 開口（Case SS-B）の結果に着目する。これらは開口が対称な配置であるため全て ΔC_P を 0 とみなしたが、それぞれにおいて緩やかではあるが $\sigma_{\Delta Cp}$ 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 が 0 かつ $\sigma_{\Delta Cp}$ も同程度な場合があるにも関わらず、異なる AFR の値が得られた。前述の乱れの換気のメカニズムを考えると、脈動現象に関連すると思われる開口間風圧差の変動は同程度であっても、開口部付近での乱流拡散による混合性状が異なる可能性がある。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、Case SS-F の条件では高風速の気流が衝突する領域、Case SS-B 条件では比較的低風速が複雑な気流場を構成する後流域に開口が配置されており、平均風速・乱流特性が異なることに起因する混合性状の違いが換気量の差異の要因になる可能性がある。このことから開口部での乱流拡散も換気に大きく寄与すると思われ、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る。これらを踏まえて Case SS-L 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 $\sigma_{\Delta Cp}$ 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。

4. 乱れによる換気量の予測手法の検討

前章までの検討により、ΔC_P が 0 であっても乱れにより一定の換気量が得られることが確認された。**図 7** に全条件における ΔC_P と AFR の関係を、(1) 式のオリフィス式 (α=0.65) に基づいた算出結果とともに示す。この図からも ΔC_P が概ね 0.1 を下回る条件では換気量は乱れによって決まるため、オリフィス式では予測できないことが明らかである。そこで**図 7** の各プロットの横軸を ΔC_P ではなく瞬時の風圧係数差の RMS 値（$RMS_{\Delta CP}$）として修正した結果を**図 8** に示し、この図においてもオリフィス式（平方根中は ΔC_P でなく $RMS_{\Delta CP}$ と仮定）の結果を併記する。この図より、シールドモデルから $RMS_{\Delta CP}$ を取得してそれを実行風圧係数差とみなしてオリフィス式に入力することで一定の精度で乱れの影響も含んだ換気量が予測できることが示されるが、全体的に換気量を過大評価してしまう傾向にある。加えて、Case SS-F と Case SS-B の違いように、ΔC_P が微小かつ風圧変動性状も同程度の場合の混合性状の差による換気量の違いが考慮されていない手法と言え、この意味では物理モデルとして適切とは言い難い。また、乱

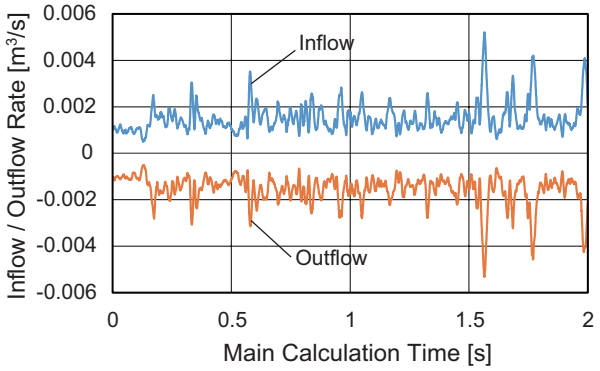


図 5　開口間の瞬時流入 / 流出量 (Case DS 0-0)

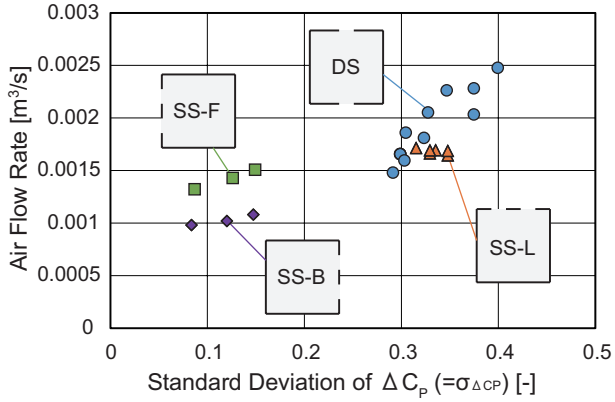


図 6　風圧係数差の標準偏差と換気量の関係

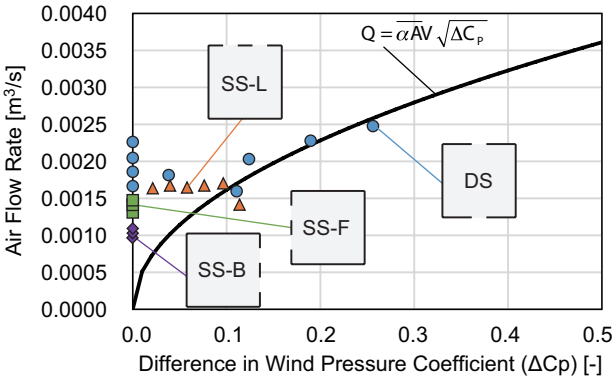


図 7　風圧係数差と換気量（AFR）の関係

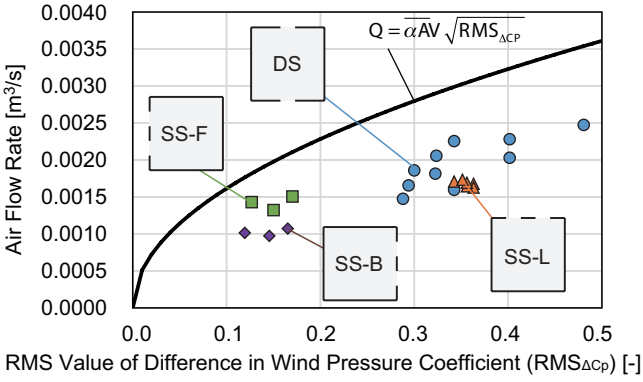


図 8　風圧係数差の RMS 値と換気量（AFR）の関係

れによる換気量予測の別の手法として、近年 Daish ら[9]により提案された片面 2 開口用の以下の式がある。

$$Q_{Pre} = \overline{A}V_1\sqrt{a \cdot \Delta C_P + b \cdot \sigma_{\Delta C_P}} \quad ...(3)$$

この式は ΔC_P に係数を乗じてその重みを軽くするとともに、瞬時の風圧係数差の標準偏差 $\sigma_{\Delta Cp}$ 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 と 0.084 が提案されている。本報の全条件の換気量をこの式で予測した AFR（Q_{Pre}）と、真値とみなす LES の AFR（Q_{CFD}）の関係を**図 9 (1)** に示す。なお、破線は誤差 30% の範囲である。この式でもある程度の精度で換気量は予測されるが、前述の RMS 値の検討と同様開口部での混合性状のみが異なる場合の換気量の差異が評価できず、結果的に Case SS-B で精度が低い。そこで筆者らは前述の乱れの換気のメカニズムに基づき脈動と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を試みる。

$$Q_{Pre} = \overline{\alpha A}V_1\sqrt{a \cdot \Delta C_P + b \cdot \sigma_{\Delta C_P}} + c \cdot \Sigma AV_2 \quad ...(4)$$

$\sigma_{\Delta Cp}$ は瞬時の通風の駆動力と捉え、Daish ら[9]と同様に有効開口面積の直列結合値に乗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]の研究に基づき、開口部単体で生じる換気と捉えて風速に開口面積を乗じて加算することで、実現象に基づく予測式を意図した。なお、V_2 は壁面近傍風速であり、本報ではシールドモデルの LES 解析結果における開口中心想定位置から法線方向に 20 mm 離れた位置のスカラー風速の時間平均値を採用した。なお、V_2 の値は**表 1** にまとめて示している。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。**図 9 (2)** 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が小さく、(3) 式よりも精度が向上した。また、混合性状が異なる Case SS-F と Case SS-B 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、$\sigma_{\Delta Cp}$ と開口部近傍風速の両者が同程度の Case SS-L で Q_{Pre} が Q_{CFD} と同じく一定の値を取り、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

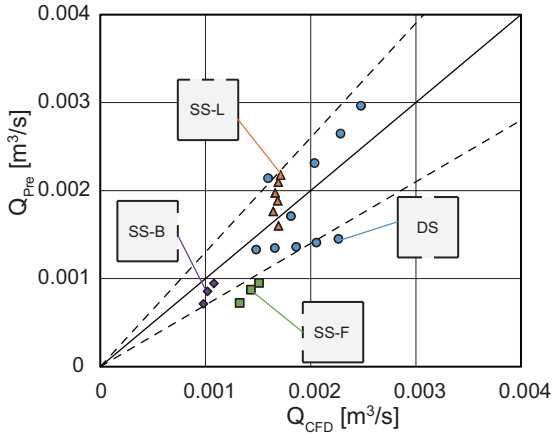
本報では微小な風圧係数差の 2 開口条件を対象に通気量の評価を行い、風の乱れによる換気量を決定する要因として、脈動に関連する開口間風圧係数差の標準偏差と、混合に関連する開口部壁面近傍風速がパラメータになり得ることを示した。また、風圧係数差の RMS 値によるオリフィス式でも予測精度は向上するが混合の影響が考慮できない点が不適切なことを示した。さらに混合と脈動を組み込んだ換気量の簡易予測手法を検討し、さらなる精度向上の可能性を示した。次報では風洞実験の結果を報告する。

謝辞

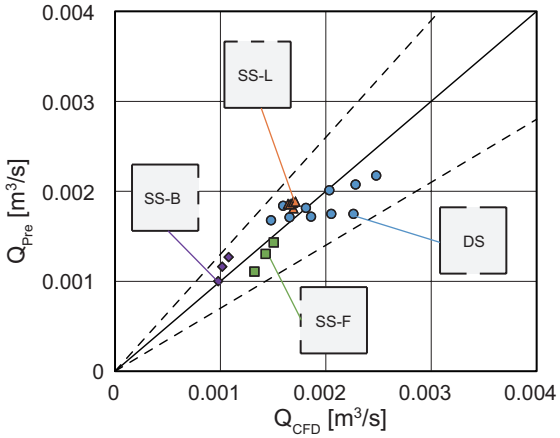
本研究の一部は JSPS 科研費（挑戦的萌芽研究 , 課題番号 JP16K14347, 研究代表者 ; 小林知広）の助成を受けた。

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, Issue 2, 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 , pp.25-34, 1989.2
3) J. P. Cockroft, P. Robertson : Ventilation of an Enclosure Through a Single Opening, *Building and Environment*, Vol.11, Issue 1, pp.29-35, 1976
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 , pp.437-443, 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気流の乱れによる換気効果に関する研究（その 5）微小な風圧係数差の 2 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
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気流の乱れによる換気効果に関する研究（その 1）LES による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
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, pp.359-371, 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



(1) Daish ら[9]の予測手法



(2) 本研究

図 9　CFD による換気量（AFR）の解析値と簡易予測値の関係

＊ 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 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.