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6)微小な風圧係数差での換気量の簡易予測手法の検討 Ventilation Effect of External Wind Turbulence for a Room with Multiple Openings (Part 6) Simplied Prediction Method of Ventilation Rate for Small Wind Pressure Difference

正会員 〇小林 知広(大阪市立大学) 正会員 梅宮 典子(大阪市立大学)正会員 藤田 拓也(大阪市立大学) Tomohiro KOBAYASHI^{*1}, Noriko UMEMIYA^{*1}, Takuya FUJITA^{*1}

*1 Osaka City University

General predition method of wind-induced ventilation rate does not work well for a room with multiple openings of small difference in time-averaged wind pressure coefficient (Cp value), because the influence of the wind turbulence is not taken into consideration. This research aims to propose a simplified prediction method of the flow rate. 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 simplied prediction method is finally shown.

1. はじめに

Inlet

(Velocity Profile)

Reference Point of

Dynamic Pressure for Cp value

1,000

2 開口での風力換気量は一般に有効開口面積 αA の直 列結合値と風圧係数差を用いて次式で算定される。

$Q = \overline{\alpha A} V \sqrt{\Delta C_p} \qquad \dots (1)$

ここで ΔC_P は開口間の風圧係数差 [-]、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。 この手法では単一開口や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 れるが、実際には乱れにより換気が行われる。乱れによ る風力換気のメカニズムは単一開口では空気の圧縮性 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"、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多くの例が見られるが 3-5)、2 開口で風圧係数差が微小な場合の換気量算定法 は確立されていない。筆者らは既報ので微小な風圧係 数差の対面開口条件を対象に LES を行い、風圧係数差 が 0.1 程度以下では(1)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、乱れによる 換気量を決定するパラメータに関する検討を行い、そ れを用いた換気量の簡易算定法について検討を行う。

Reference

(1) 風洞断面図(X-Y面)

200

ssure Point

Mode1

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 有する外寸一辺 200 mm、壁厚 2.0 mm の立方体を室モ デルとして設置した。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 開口の配置面の条件は図2に示 す通り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



に、既往の研究で評価した左右の側面に1開口ずつ設 けた対面2開口(Case DS)を加えた計4種とした。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種であるが、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 において既報⁶⁰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LES⁷⁰ 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_{θ})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。標準 *k*-*ε* モデルの結果 を初期条件とし、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換気量を評価する。開口面法線方 向成分の瞬時風速のモニター点を各開口で図4に示す 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 均を瞬時の換気量とし、さらにそれを全 time step で時 間平均して (2) 式により AFR [m³/s] として算出する。

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

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、瞬時流入出の風量収支は概ね取れており、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 σ_{4Cp} として示すとともに、各条件で得られたAFR (Q_{CPD})

表 2 CFD 解析条件

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])								
Doundary	Inlet	1/5 Power law(Smirnov's method)								
Boundary	Outlet	Gauge Pressure :0 [Pa]								
Condition	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	SS-F 2		SS-F 3				
			1,526,425	1,362,560		1,369,615				
		CC D	SS-F 4	SS-F 5		SS-F 6				
		55-В	1,526,425	1,362,560		1,369,615				



Description	Case	Central Position of Opening (X,Y,Z) [mm]				- []	V2 [m/s]		AFR	AFR (Q_{Pre}) [m ³ /s]	
		Opening 1	Opening 2		ΔCp [-]	σ _{ΔCp} [-]	Opening 1	Opening 2	$(Q_{CFD})[m^3/s]$	Daish et al.	Present paper
US US	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-L1	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-L2	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-L4	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-L6	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-F1	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 I	SS-B1	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

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差で考えると換気駆動力が ないにも関わらず 0.00148 ~ 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 s⁻¹ 程度の 換気回数である。一方 σ_{ACP} に着目すると概ね 0.3 程度と なっており、脈動現象により換気が行われると考えられ る。このため、 σ_{ACP} 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、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 σ_{ACP} 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 σ_{ACP}

次に Case SS-F と 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 $\Delta C_p \ge 0$ とみ なしたが、図6 ではそれぞれ緩やかではあるが σ_{ACp} と AFR に正の相関が見られる。しかし、両配置条件を比 較すると ΔC_p が 0 かつ σ_{ACp} も同程度な場合があるにも 関わらず、異なる AFR の値が得られている。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山中ら ⁴⁾ や筆者ら⁷⁾ の研究例では、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-B 条 件では高風速の気流が衝突する領域、Case SS-B 条



に開口が配置されており、平均風速と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 σ_{ACp} が同程度かつ混合に関わる壁面近傍の気流性状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 (α =0.65) に基づく算出結果とともに示す。この結果からも 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、(1)式では予測できないと言える。そこで図 7の各プロットの横軸を ΔCp ではなく瞬時の風圧係数 差の RMS 値 (RMS_{ACP}) として修正した結果を図8に 示し、この図においても(1)式(平方根中はΔCpでなく RMS_{ACP}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_{ΔCP}を取得してそれを実行風圧係 数差とみなして(1)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。乱れに 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 開口を対象とする以下の式がある。

...(3)

$Q_{Pre} = \overline{A}V_1 \sqrt{a \cdot \Delta C_P + b \cdot \sigma_{\Delta C_P}}$

上式は ΔC_P に係数を乗じてその重みを軽くするとと もに、 σ_{ACP} 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 値の検討と同様に開口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-F で 精度が低い。そこで筆者らは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ために、次式の ように混合の影響も組み込んだ予測を試みる。

 $Q_{Pre} = \overline{\alpha A} V_1 \sqrt{a \cdot \Delta C_p + b \cdot \sigma_{\Delta C_p}} + c \cdot \Sigma A V_2 \qquad \dots (4)$

 σ_{ACp} 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とらえて開口部近傍風速 V。 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。本報では V, 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,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 Qpre と解析値 QCFD 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、 σ_{ACp} と 開口部近傍風速の両者が同程度の Case SS-L で Qpre が



6. 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、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近傍風速がパラメータになり得る ことを示した上で、それらを組み込んだ簡易予測手法 の検討を行い、精度向上の可能性を示した。次報では 風洞実験による換気量評価を行った結果を報告する。

【謝辞】

本研究の一部はJSPS 科研費(挑戦的萌芽研究,課題番号 JP16K 14347,研究代表者;小林知広)の助成を受けた。

【参考文献】

- 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
- F. Haghighat, H. Brohus, and J. Rao : Modelling air infiltration due to wind fluctuations - a review, *Building and Environment*, Vol.35, pp.377-385, 2000
- 3) 楢崎正也,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
- 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),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
- 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
- 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

