

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量の簡易予測手法 SIMPLIFIED PREDICTION OF FLOW RATE OF VENTILATION CAUSED BY AIRFLOW TURBULENCE FOR A ROOM WITH MULTIPLE OPENINGS

建築環境分野 藤田拓也

Division of Architectural Environmental Engineering Takuya FUJITA

本研究は微小な風圧係数差の2開口を有する室を対象とし、主にLESを用いたCFD解析により気流の乱れによる換気量の簡易予測式の提案を目的とする。まず風洞実験によりCFDの解析精度を検証するための真値を取得し、パラメトリックスタディにより乱れによる換気傾向を把握した。次にCFDの精度検証で適切な解析手法を選定した後、風速に基づくAir Flow Rate (AFR) と濃度に基づくPurging Flow Rate (PFR) で異なる開口条件の換気量を評価し、乱れによる換気メカニズムである混合と脈動に即した予測手法を示した。

The purpose of this research is to propose a simplified prediction method of the flow rate for a room with minute wind pressure coefficient difference mainly by using LES. Firstly, wind tunnel test was carried out to get true value for accuracy validation of CFD and to grasp the tend of flow rate caused by airflow turbulence by parametric study. Secondly, appropriate analysis method was selected by accuracy validation of CFD, and flow rate of different opening arrangement cases were evaluated by Air Flow Rate (AFR) based on wind speed and Purging Flow Rate (PFR) based on indoor concentration. And finally, simplified prediction formula was proposed based on the mixing and pulsation which are the mechanisms of flow rate caused by airflow turbulence.

1. はじめに

風力換気による換気量の算出には一般に以下のオリフィス式が用いられる。

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

ここで、 αA は有効開口面積 [m²]、 C_p は風圧係数 [-]、 V は外部風速 [m/s] である。単一開口や風圧係数差がない複数開口の場合、平均的な換気駆動力は0となるが、実際には気流の乱れが駆動力となる換気が生じている。乱れによる換気の研究として、単一開口に関する研究は多く見られ、換気メカニズムは開口部での乱流拡散による混合現象と空気の圧縮性による脈動現象の2種とされており^{1,2)}、実現象はこれらが複合して生じていると考えられる。複数開口においても2種のメカニズムで換気が行われ、檜崎・山中ら^{3,4)}、河野・加藤ら⁵⁾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。そこで本研究では風圧係数差が微小な条件を対象に、室内濃度に基づく換

気量であるPurging Flow Rate (PFR)^{6,7)} と開口部風速に基づく通気量であるAir Flow Rate (AFR) で乱れによる換気効果を把握し、最終的に乱れによる換気量の簡易予測手法を2種のメカニズムに基づいて提案する。

2. 風洞実験によるCFD精度検証のための真値取得

風洞実験によりモデル周辺風速、風圧係数、換気量の3項目を取得し、CFD精度検証時の真値とする。実験は大阪市立大学研究用風洞で測定胴高さ1,200 mm、幅1,500 mmのエッフェル型の風洞で実験を行う(図1)。風洞床上800 mm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2にI型熱線流速計(日本カノマックス, 0251R-T5型φ5μm タングステン)により測定(1.0 kHz, 60 s)したアプローチフローのプロファイルの一例を示す。対象室モデルは壁厚2 mm、外寸一辺200 mmのアクリル模型で、モデル周辺風速および風圧係数の取得には開口のないシールドモデルを用い、換気量の取得には後述する

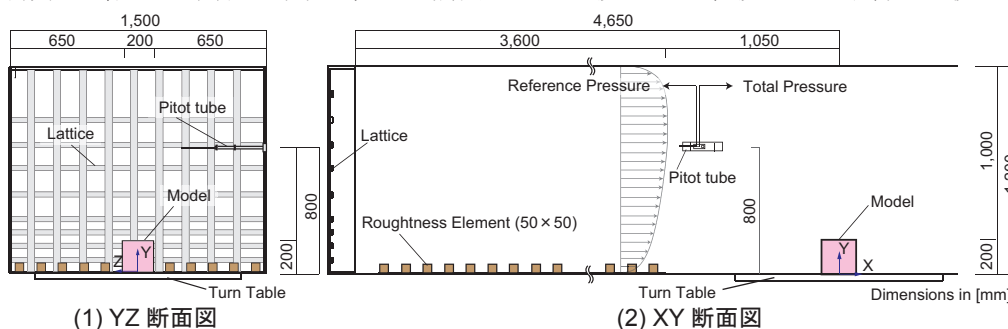


図1 風洞実験の概要

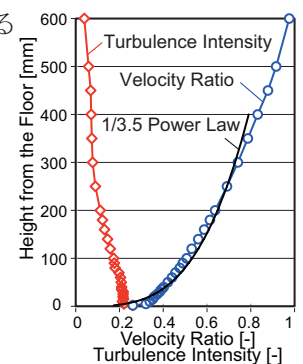


図2 アプローチフロー

Case LR-1, Case LR-4, Case LR-7 の開口配置条件において実験を行った。表 1 に測定項目の概要を示す。

モデル周辺風速の取得では、I 型熱線流速計を用いて室モデルの側壁面近傍の風速を測定する。測定点は主流方向に 20 mm 間隔、法線方向に 10 mm 間隔で計 220 点設定し、高さは床上 100 mm で統一した。また、プローブはワイヤーが側壁面に直交する向きにアームで固定し、アームはトラバーサーに取り付けて各点の測定 (1 kHz, 60 s) を行った。

風圧係数の取得では、微差圧計 (Validyne 社, DP45) を用いて室モデルの前面、後面、左側面の 3 面を測定面として対称性を仮定し、水平方向に 10 mm 間隔で各面 19 点、計 57 点で測定 (1.0 kHz, 60 s) した。測定点の高さは床上 100 mm で統一し、風圧係数の基準静圧はピトー管高さの静圧、基準動圧はモデル軒高 (200 mm) におけるアプローチフローを採用した。

換気量の取得では、CO₂ を用いたトレーサガス法による濃度測定を行う。濃度はマルチガスモニター (LumaSense Technologies, Innova 1312, 校正濃度 5,000 ppm) により模型内の空気を吸引して測定する。吸引は室平面中心位置に立てた外径 3.5 mm の配管から床上 50, 100, 150 mm の高さでそれぞれ四方に直径 1.0 mm の吸引口を設けた 12 点から吸引し、室内の平均濃度を意図した値を測定した。実験はまず風洞内で気流を発生させた状態で CO₂ 濃度を 5 分間測定し、その平均値を外気濃度とする。その後ボンベから CO₂ を噴出し、マスフローコントローラ (Fujikin, FCST 1005 LC) で流量を 250 ccm に制御して模型内にガスを供給し、ガス

表 1 精度検証の測定項目

Target	Simplified Schematic (Plan View, Elevation View)
Wind Speed around Model	
Cp	
Flow Rate	

モニターで測定した濃度が十分定常に達したのを確認した後の 10 分間のデータの平均値を定常濃度とみなした。供給は、床上 50 mm の高さに 4 箇所設けた配管上端からガス供給を行い、一様発生を想定した均一発生とした。換気量の評価には次式に示す対象領域内で汚染質の希釈・排出に有効な換気量を表す Purging Flow Rate (PFR) で評価する。

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

ここで、 m は単位時間当たりの室内 CO₂ 発生量 [m³/s]、 c_r は室内定常濃度 [-]、 c_o は外気濃度 [-] である。

3. 風洞実験によるパラメトリックスタディ

3.1 実験概要

実験は前章と同様、大阪市立大学研究用風洞で行った。室モデルの開口配置条件は、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。この 3 種の条件において右側面の開口位置を水平方向に移動させた 7 箇所を設定し、計 21 条件において実験を行った。また、他方の開口位置は固定し、開口部中心高さは全条件で模型中心高さの 100mm で統一した。表 2 に配置条件の概要と次項で述べる解析結果を併せて示す。測定は上記 21 条件においてトレーサガス法による換気量の測定とシールドモデルを用いて各条件の開口中心想定位置における風圧係数差の瞬時値の測定を行った。

3.2 実験結果

図 3 に風圧係数差 (以降 ΔC_p) と PFR の関係を (1) 式による算定結果 ($\alpha=0.65$ 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

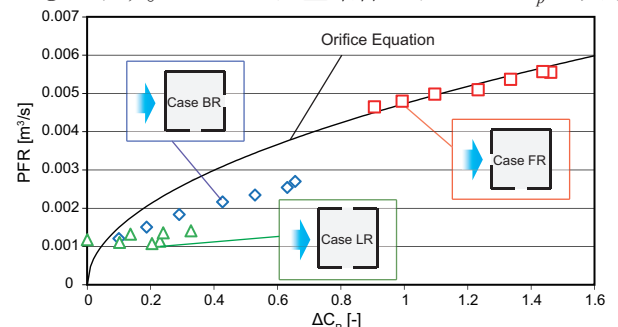


図 3 風圧係数差と換気量の関係

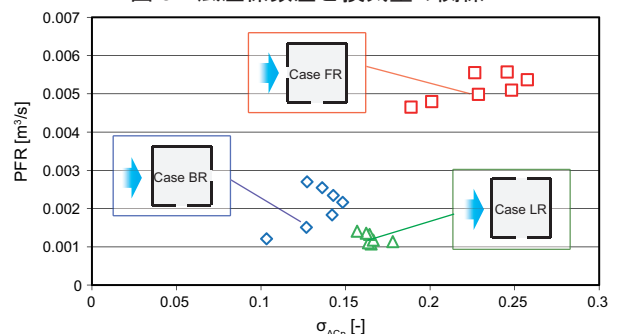


図 4 風圧係数差の標準偏差と換気量の関係

くなるとともに換気量が増加し、(1)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、(1)式より小さい結果となった。これは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。一方、Case LR については ΔC_p は 0~0.3 程度の範囲で分布しているものの換気量は概ね一定の値となった。したがって、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駆動力になっている可能性が考えられる。そこで各条件における風圧係数差の標準偏差（以降 $\sigma_{\Delta C_p}$ ）と PFR の関係を図 4 に示す。Case LR は $\sigma_{\Delta C_p}$ が同程度であることが換気量が同程度になったことの原因のひとつと推察される。加えて乱れによる換気メカニズムを考えると $\sigma_{\Delta C_p}$ は空気の圧縮性に起因する脈動成分を表すパラメータの一つになり得ると言える。

4. CFD 解析の精度検証

4.1 解析概要

風洞実験を再現した CFD 解析を行う。解析手法は先行研究⁸⁾の手法を倣って解析を行った。図 5 に解析領域およびメッシュレイアウトの一例を示す。

解析は LES を用いた解析を行う。まず標準 $k-\varepsilon$ モ

デル (SKE) の解析結果を初期値とし、計算時間間隔を 1/2000 [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 10 [s] を本計算とした。流入境界は図 2 に示すアプローチフローを採用し、Smirnov ら⁹⁾の手法により変動風を与えた。表 3 に以降で行う CFD 解析も含めて概要をまとめて示す。

表 3 CFD 解析条件

Turbulence Model		Large Eddy Simulation Smagorinsky-Lilly Model(Cs=0.1)					
CFD Code		Fluent 17.0					
Algorithm		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	1/3.5 Power law(Smirnov's method) 1/5 Power law(Smirnov's method)					
	Outlet	Gauge Pressure :0[Pa]					
	Walls	Two Layer Model of Linear-Log Law					
Total Number of Cells	Sealed Model	Primary Grid 349,411		Refined Grid 1,966,720			
		CaseLR-1 1,753,350	CaseLR-4 1,192,100	CaseLR-7 1,753,350			
	Open Model	DS	DS 0-0	DS 0-1	DS 0-2	DS 0-3	DS 0-4
			757,253	728,613	728,613	728,613	728,613
			DS 1	DS 2	DS 3	DS 4	DS 5
			1,072,323	1,100,923	1,166,275	1,213,571	1,207,659
			SS-L 1	SS-L 2	SS-L 3		
		1,409,229	1,433,465	1,457,701			
		SS-L 4	SS-L 5	SS-L 6			
		1,506,173	1,524,350	1,560,704			
SS-F	SS-F 1	SS-F 2	SS-F 3				
	1,526,425	1,362,560	1,369,615				
SS-B	SS-B 1	SS-B 2	SS-B 3				
	1,526,425	1,362,560	1,369,615				

表 2 風洞実験条件および実験結果

Description	Case	Central Position of Opening (X, Y, Z) [mm]		ΔC_p [-]	$\sigma_{\Delta C_p}$ [-]	PFR [L/min]
		Opening 1	Opening 2			
	Case FR-1	(-100,100,0)	r = 40 (-60, 100, 100)	1.46	0.226	333
	Case FR-2	(-100,100,0)	r = 60 (-40, 100, 100)	1.44	0.245	334
	Case FR-3	(-100,100,0)	r = 80 (-20, 100, 100)	1.33	0.257	322
	Case FR-4	(-100,100,0)	r = 100 (0, 100, 100)	1.23	0.248	306
	Case FR-5	(-100,100,0)	r = 120 (-20, 100, 100)	1.10	0.229	299
	Case FR-6	(-100,100,0)	r = 140 (-40, 100, 100)	0.99	0.201	288
	Case FR-7	(-100,100,0)	r = 160 (-60, 100, 100)	0.91	0.189	279
	Case BR-1	(100,100,0)	r = 40 (-60, 100, 100)	0.66	0.127	162
	Case BR-2	(100,100,0)	r = 60 (-40, 100, 100)	0.63	0.136	153
	Case BR-3	(100,100,0)	r = 80 (-20, 100, 100)	0.53	0.143	141
	Case BR-4	(100,100,0)	r = 100 (0, 100, 100)	0.43	0.148	130
	Case BR-5	(100,100,0)	r = 120 (-20, 100, 100)	0.29	0.142	110
	Case BR-6	(100,100,0)	r = 140 (-40, 100, 100)	0.19	0.127	90.4
	Case BR-7	(100,100,0)	r = 160 (-60, 100, 100)	0.10	0.103	72.5
	Case LR-1	(0,100,-100)	r = 40 (-60, 100, 100)	0.23	0.178	68.1
	Case LR-2	(0,100,-100)	r = 60 (-40, 100, 100)	0.20	0.165	64.5
	Case LR-3	(0,100,-100)	r = 80 (-20, 100, 100)	0.10	0.163	66.4
	Case LR-4	(0,100,-100)	r = 100 (0, 100, 100)	0.00	0.166	70.5
	Case LR-5	(0,100,-100)	r = 120 (-20, 100, 100)	0.14	0.164	79.4
	Case LR-6	(0,100,-100)	r = 140 (-40, 100, 100)	0.24	0.162	81.4
	Case LR-7	(0,100,-100)	r = 160 (-60, 100, 100)	0.33	0.157	84.5

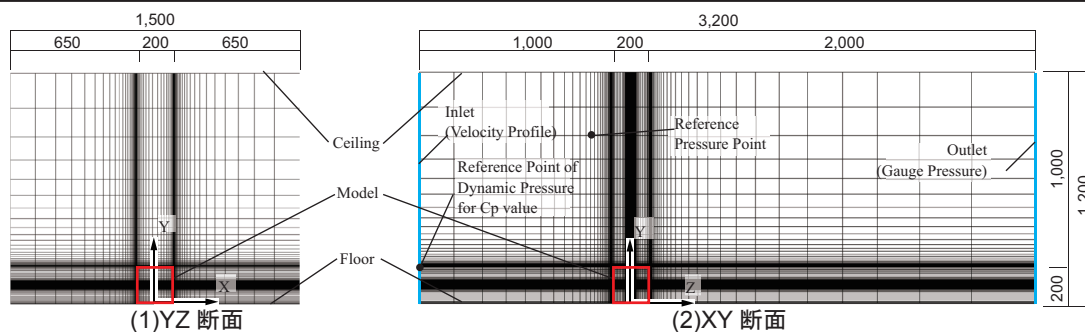


図 5 解析領域およびメッシュレイアウト

換気量評価は風洞実験と同様に PFR で評価を行う。再現方法は実験と同じ4点から1/2000 [s]ごとに粒子を発生させて、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 を求めた。

4.2 解析結果

モデル周辺風速の実験値を再現するため、熱線に直交する方向の瞬時風速2成分 (v_x, v_y) の合成ベクトルと仮定し、以下の式で実験値の再現とした。

$$V_{LES-hotwire} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \dots(3)$$

図6に左側面近傍の平均風速分布を、図7に(X, Y, Z)=(0, 100, -110)におけるパワースペクトルを、図8に平均風圧係数の分布を解析値・実験値ともに示す。なお、同図には以降で行う精度向上の検討結果も併せて示している。平均風速分布の結果を見ると実験値と概ね一致し、十分な精度が得られている。パワースペクトルはParzen ウィンドウ¹⁰⁾により平滑化を施し、-5/3乗の傾きと併せて示している。実験値では-5/3乗の傾きに沿ってパワーが落ちているが、解析値(Primary Grid)では高周波でパワーが大きく落ちている。このことからシールドモデルは解析格子の解像度不足が考えられる。風圧係数分布は前面の分布は非常によく一致し、後面も概ね一致している。一方、左側面は誤差が大きく、これは前述の解析格子の解像度不足に起因している可能

性がある。換気量について、PFRは前述の通り定常濃度から算出する必要があるが、解析時間が実験と比較して不十分で定常濃度に至らない可能性を考慮し、以下の汚染質濃度予測式を用いてCFD解析の汚染質濃度と予測濃度の差の二乗和が最小となるような換気回数 n [1/s] を同定することで PFR(= nV) を算出した。

$$C_r(t) = \frac{q_p}{nV} (1 - e^{-nt}) \quad \dots(4)$$

図9にCase LR-1, Case LR-4, Case LR-7における換気量の解析値・実験値をともに示す。換気量については実験値とよく一致したと言える。これは風圧係数の分布が実験値と異なっても、モデル周辺風速の平均的な気流場の解析精度が比較的高かったことから先行研究⁸⁾の解析手法でも換気量の解析精度が比較的高くなったと考えられる。

以降のCFD解析では、先行研究⁸⁾の解析手法に倣って解析を行っているが、既往のシールドモデルの解析格子では解像度不足による解析精度低下が推察されたため、ここで予測式提案後に精度向上の検討を行った結果を報告する。解析格子を先行研究の約35万メッシュ(Primary Grid)から約200万メッシュ(Refined Grid)に増加し、解析精度の向上を検討した。モデル周辺風速、パワースペクトル、風圧係数の結果をそれぞれ既出の図6, 7, 8に示す。モデル周辺風速はさらに実験値に近づき、パワースペクトルもより高周波まで実験値に近づく結果となった。風圧係数の分布も前面に加え後面も非常によく一致し、左側面においても実験値と同様の傾向を示したことから、解像度が解析精度不足に起因する要素の一つであることが示された。

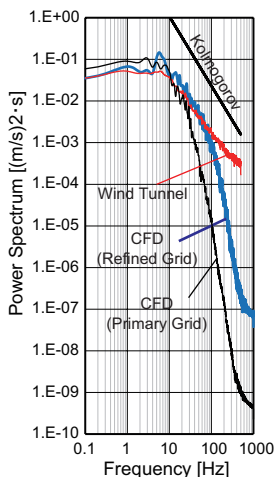


図7 パワースペクトルの比較

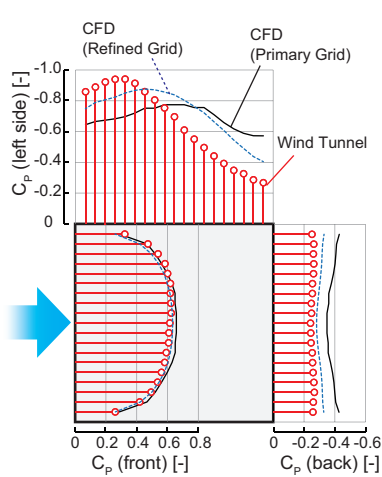


図8 風圧係数の分布の比較

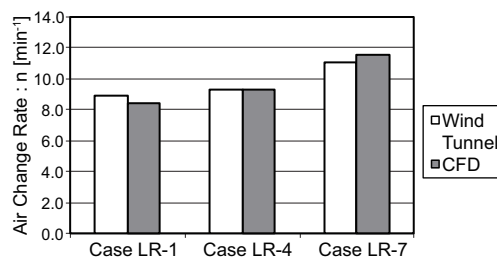


図9 換気量の比較

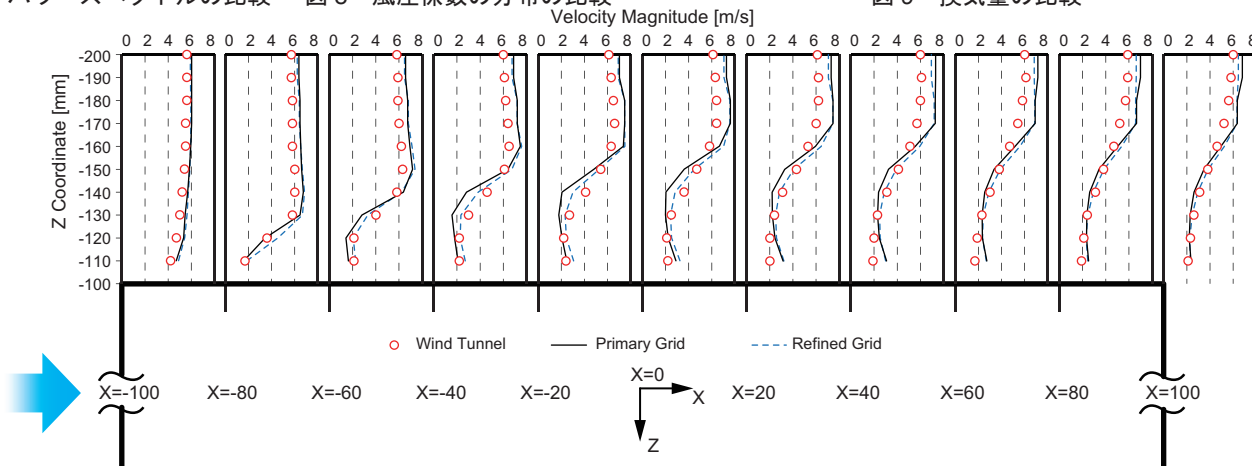


図6 モデル周辺風速の比較

5. 微小な風圧係数差における乱れによる換気効果

5.1 解析条件

風洞での縮小模型実験を模擬した CFD 解析を行う。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、1/5 べき乗則の風が室モデルにアプローチする。解析手法は表 3 と同様である。

室モデルの開口配置面の条件は風上側からみて左右側面にそれぞれ 1 つ開口を設置した対面開口条件 (DS)、片面 2 開口条件として左側面に 2 つ設置した SS-L、風上面に 2 つ設置した SS-F、風下面に 2 つ設置した SS-B の計 4 種で検討を行った。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、DS においては 10 条件、SS-L では 6 条件、SS-F および SS-B では各 3 条件を設定し、計 22 条件を解析条件とした。表 4 に解析条件の概要と次項で述べる解析結果を併せて示す。

換気量の評価には前章で使用した PFR に加え、風速ベースの通気量で換気量を評価する。これは開口面に法線方向に流入する瞬時風速をモニターし、面積で積分することで換気量を評価する。開口面法線方向の瞬時風速のモニター点は各開口 64 点ずつ設置し、両開口からの瞬時流入風量 Q_{in} および瞬時流出風量 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 で時間平均して下記の式より Air Flow Rate (AFR) として算出した。

$$AFR = \frac{|Q_{out}| + |Q_{in}|}{2} \text{ [m}^3/\text{s]} \quad \dots(5)$$

5.2 解析結果

まず AFR と PFR の関係について、AFR は開口部を通過した空気量を表し、PFR はそのうち換気に有効に働いた量を表すため、AFR は PFR より大きくなる。表 4 の結果を見るとほとんどの条件において PFR より AFR の方が換気量が大きくなる結果となったが、SS-F、SS-B においては PFR のほうが換気量を大きく評価する結果となった。これは Particle 発生が一様発生を想定した均一発生であり、粒子が流出しやすい条件下であった可能性があるため、本来の PFR より過大に換気量を評価したと考えられる。

図 10 に各条件の換気量と ΔC_p の関係 (1) 式 ($\alpha=0.65$ で直列結合) と併せて示す。ここで (1) 式で予測される換気量は開口部を通過した空気量を表すため、(1) 式と比較すべきは AFR であり、以降では AFR の解析結果のみを示す。結果を見ると ΔC_p が 0.1 [-] 程度以下では (1) 式の精度が大きく低下し、少なくともこの範囲では気流の乱れによる換気が支配的と考えられる。

図 11 に $\sigma_{\Delta C_p}$ と AFR の関係を示す。全条件で正の相関が見られ、実験でも推察されたように $\sigma_{\Delta C_p}$ が脈動を

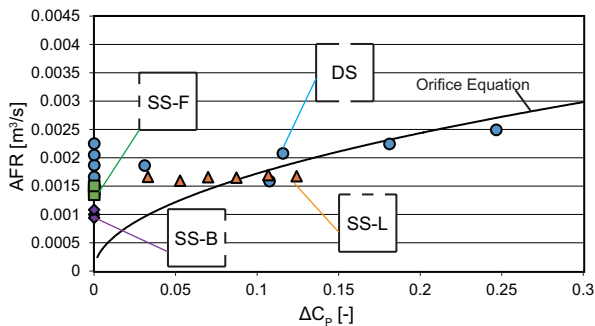


図 10 風圧係数差と換気量の関係

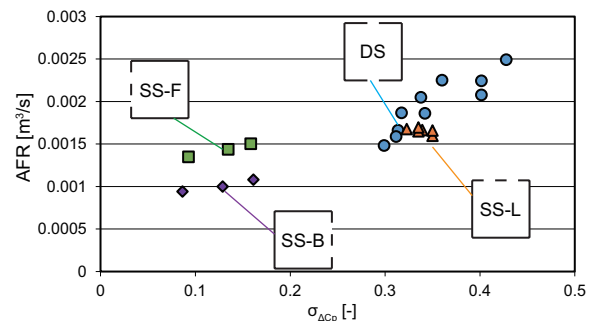


図 11 風圧係数差の標準偏差と換気量の関係

表 4 CFD 解析条件および結果

Description	Case	Central Position of Opening [mm]		ΔC_p [-]	$\sigma_{\Delta C_p}$ [-]	V_2 [m/s]		PFR [m³/s]	AFR (Q_{CFD}) [m³/s]	AFR (Q_{Daish}) [m³/s]	
		Opening 1	Opening 2			Opening 1	Opening 2			Daish et al.	Present paper
Wind → [DS]	DS 0-0	L=100	R=100	0.000	0.317	1.627	1.653	0.001848	0.001868	0.001389	0.001737
	DS 0-1	L=80	R=80	0.000	0.314	1.661	1.680	0.001597	0.001663	0.001381	0.001733
	DS 0-2	L=60	R=60	0.000	0.299	1.599	1.579	0.001339	0.001482	0.001348	0.001686
	DS 0-3	L=120	R=120	0.000	0.338	1.491	1.518	0.001993	0.002050	0.001433	0.001766
	DS 0-4	L=140	R=140	0.000	0.360	1.241	1.255	0.002175	0.002251	0.001479	0.001781
	DS 1	L=80	R=100	0.031	0.342	1.661	1.653	0.001620	0.001862	0.001688	0.001825
	DS 2	L=80	R=40	0.107	0.311	1.661	1.385	0.001430	0.001589	0.002136	0.001804
	DS 3	L=80	R=120	0.116	0.401	1.661	1.518	0.001833	0.002077	0.002305	0.002010
	DS 4	L=80	R=130	0.181	0.401	1.661	1.409	0.002000	0.002244	0.002634	0.002052
	DS 5	L=80	R=140	0.247	0.428	1.661	1.255	0.002320	0.002493	0.002953	0.002139
Wind → [SS-L]	SS-L 1	L1=100	L2=55	0.033	0.339	1.627	1.575	0.001278	0.001664	0.001697	0.001812
	SS-L 2	L1=100	L2=50	0.053	0.350	1.627	1.532	0.001217	0.001596	0.001854	0.001850
	SS-L 3	L1=100	L2=45	0.070	0.350	1.627	1.477	0.001263	0.001657	0.001966	0.001861
	SS-L 4	L1=100	L2=40	0.087	0.335	1.627	1.437	0.001285	0.001649	0.002051	0.001840
	SS-L 5	L1=100	L2=35	0.107	0.335	1.627	1.444	0.001285	0.001694	0.002166	0.001857
	SS-L 6	L1=100	L2=30	0.124	0.323	1.627	1.615	0.001293	0.001675	0.002246	0.001857
Wind → [SS-F]	SS-F 1	F1=40	F2=40	0.000	0.134	2.236	2.213	0.001666	0.001437	0.000904	0.001294
	SS-F 2	F1=30	F2=30	0.000	0.093	2.005	1.993	0.001559	0.001349	0.000750	0.001095
	SS-F 3	F1=50	F2=50	0.000	0.158	2.517	2.485	0.001658	0.001505	0.000981	0.001416
Wind → [SS-B]	SS-B 1	B1=40	B2=40	0.000	0.129	1.517	1.520	0.001171	0.001000	0.000884	0.001173
	SS-B 2	B1=30	B2=30	0.000	0.086	1.455	1.458	0.001103	0.000940	0.000725	0.000991
	SS-B 3	B1=50	B2=150	0.000	0.161	1.573	1.579	0.001179	0.001080	0.000990	0.001296

表す重要なパラメータになり得ると考えられる。ここで SS-F と SS-B の結果に着目すると ΔC_p が 0 かつ脈動現象に関連すると思われる $\sigma_{\Delta C_p}$ も同程度の条件同士でも、異なる AFR の値が得られている。前述の乱れによる換気メカニズムを考えると、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⁾や先行研究⁸⁾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 の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で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に基づくモデル化という意味で好ましいと考える。

6. 乱れによる換気の簡易予測式の提案

乱れによる換気量の予測手法として、近年 Daish ら¹¹⁾が提案した予測式を次式に示す。

$$Q_{Pre} = \alpha AV_1 \sqrt{a \cdot \Delta C_p + b \cdot \sigma_{\Delta C_p}} \quad \dots(6)$$

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、 $\sigma_{\Delta C_p}$ 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 と 0.084 が提案されている。本研究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 12(1) に示す。なお、破線は誤差 30% の範囲である。(6) 式でもある程度の精度で換気量は予測されるが、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 SS-F で精度が低い。そこで乱れによる換気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、次式で予測を試みる。

$$Q_{Pre} = \alpha AV_1 \sqrt{a \cdot \Delta C_p + b \cdot \sigma_{\Delta C_p} + c \cdot \Sigma AV_2} \quad \dots(7)$$

$\sigma_{\Delta C_p}$ は瞬時の通風の駆動力と捉え、Daish ら¹¹⁾と同様に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⁾や先行研究⁸⁾に基づき、開口部単体で生じる換気と捉えて開口部近傍風速 V_2 に開口面積 A を乗じて加算することで、実現に基づく予測を意図した。本報では V_2 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。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 12(2) に同定結果 ($a=0.149$, $b=0.262$, $c=0.053$) に基づいた予測値 Q_{Pre} と解析値 Q_{CFD} の関係を示す。全条件において (6) 式よりも精度が向上して

おり、混合性状が異なる SS-F と 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、 $\sigma_{\Delta C_p}$ と V_2 の両者が同程度の 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。

7. まとめ

本研究では微小な風圧係数差を有する 2 開口条件を対象に気流の乱れによる換気量の簡易予測手法を提案した。結果、乱れによる換気メカニズムである混合と脈動の両者を考慮した予測式では脈動のみを考慮した Daish ら¹¹⁾の予測式より高精度で予測でき、実現に基づいた予測手法が妥当であることが示された。今後は本研究で示唆された解析精度の向上の検討に加え、設定条件を増やして予測式の更なる向上ならびに適応範囲の拡大が課題である。

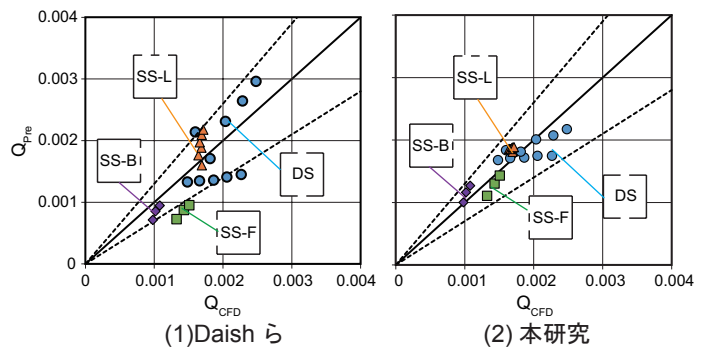


図 12 換気量の予測値と解析値の関係

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, pp.25-34, 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, pp.437-443, 2008.4
- 6) M. Sandberg and D. Etheridge : BUILDING VENTILATION - Theory and Measurement, John Wiley & Sons Ltd, 1996
- 7) 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
- 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, 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
- 10) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994
- 11) 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