

単純住宅モデルを対象とした変動気流場における室内外通風性状の解析

LES(Large-Eddy Simulation)による住宅の自然換気・通風性状に関する研究 その1

ANALYSIS OF CROSS VENTILATION AIRFLOW IN AND AROUND SIMPLE HOUSE MODEL CONSIDERING FLOW FLUCTUATION

Study on naturally cross-ventilated house using large-eddy simulation(LES) part 1

高野 康夫*, 赤林 伸一**, 富永 穎秀***,
坂口 淳****, 本田 美穂*****, 有波 裕貴*

*Yasuo TAKANO, Shin-ichi AKABAYASHI, Yoshihide TOMINAGA,
Jun SAKAGUCHI, Miho HONDA and Yuki ARINAMI*

Natural cross ventilation in house is commonly used as ventilation method in Japan. It is influenced by wind direction, distribution of wind velocity and total pressure on walls. Cross ventilation is not observed with using Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation (RANS), nevertheless occurs in actual phenomena. Flow field in the house varies depending on fluctuating wind. For example, cross ventilation is affected by the wind turbulence around the house, in case of two openings positioned symmetrically on opposite walls parallel to wind direction. Therefore, replicating actual phenomena with using CFD is very important to provide evaluation method for ventilation design. Recently, unsteady fluid flow phenomena are analyzed using Large-Eddy Simulation (LES). In this study, opening conditions and wind direction are calculation variables, five cross ventilated simple house models are calculated using LES. Distributions of instantaneous wind speed ratio and pressure, mean wind speed ratio about cross-ventilated houses are reported. In opening conditions that time-averaged inflow is not observed, instantaneous inflow caused by pressure difference on the walls is generated by turns at each opening. Unsteady cross ventilation is replicated with using LES under opening conditions that obtain no-ventilation in steady-state flow field.

Keywords : Computational Fluid Dynamics(CFD), Large-Eddy Simulation(LES), Airflow Distribution, Natural Cross-ventilation, Fluctuating Flow
数値流体力学(CFD), Large-Eddy Simulation(LES), 気流分布, 自然通風, 変動気流

1. はじめに

建物の自然換気・通風性能の評価に関する研究では、外部風の時間的変動を考慮した実現象により近い実験・解析手法で評価することが期待されている。既往研究^{1, 2, 3)}では主に Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation(RANS)を用いた数値流体力学(CFD)が行われ、時間的変化が均されたアンサンブル平均値によって室内流入風速や室内の風速比分布、通風量等の通風気流性状が明らかにされている。しかし実現象では、外部風は絶えず変動し、それに応じて室内の通風気流の速度分布も変化するため、瞬時の通風性状を把握するためには時間的変動を解析できるRANSモデル以外の解析手法を用いることが望ましい。

例えば風向に対し対称的な位置に2箇所の開口部がある開口条件では、流体力学の理論上、時間平均的には開口部間の圧力差が生じないため、風速変動を考慮しない時間平均的な数値解析では室内への気流の流入・流出が無い解析結果が算出される。しかし風洞実験では、接近流の変動により両開口部間に瞬時の圧力差が生じ、開

口部から室内へ通風気流が流入・流出する様子が観察されている⁴⁾。従って数値流体力学においてもRANSモデルのような定常解析だけでは自然換気・通風性能を評価することは不十分な場合がある。瞬時的な通風性状を含んだ通風性能の評価を行うためには、外部風の風速変動^{注1)}を考慮した非定常解析手法による新たな自然換気・通風性能評価手法が必要である。

非定常気流解析に関する既往研究では、建物周辺や街区の気流解析手法としてLarge-Eddy Simulation(以下LES)を用いた研究が行われている。例えば富永ら⁵⁾は、単体立方体モデル周辺の汚染質を対象とした風洞実験を行い、RANSとLESの解析結果を比較検討している。この研究成果によると、LESを用いた解析では建物近傍の非定常な気流変動が再現される為、RANSを用いた解析結果よりも風洞実験結果に近い結果が得られる事を明らかにしている。加藤ら⁶⁾はLESを使用して单一開口を対象とした流入出特性に関する基礎的な検討を行い、流入出に関する物理的なメカニズムについて、室内で形成される渦の性状が流れ場を特徴づける事を明らかにしている。更に

* 新潟大学大学院自然科学研究科 大学院生・修士(工学)
 ** 新潟大学大学院自然科学研究科 教授・工博
 *** 新潟工業大学建築学科 教授・博士(工学)
 **** 新潟県立大学国際地域学部国際地域学科
 教授・博士(工学)
 ***** 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 修士(工学)
 (当時 新潟大学 大学院生)

Grad. Stud., Graduate School of Science and Technology, Niigata University, M. Eng.
 Prof., Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Dr. Eng.
 Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Niigata Institute of Technology, Dr. Eng.
 Prof., Faculty of International Studies and Regional Development, Department of International Studies and Regional Development, University of Niigata Prefecture, Dr. Eng.
 Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency, M. Eng.
 (Former Grad. Stud., Graduate School of Science and Technology, Niigata University)

倉渢ら^{7, 8)}は、局所相似性の仮定に基づく通風量と流入角の計算方法を提案すると共に、LES と風洞実験の両面から検討を加え、剥離による全圧損失について重要な知見を報告している。

ここに示した既往の研究は、LES を用いて建物周囲の気流性状を解明し、自然通風による気流の流入出メカニズムを明らかにするものである。しかし、定常的には圧力差が生じない開口条件を対象に LES を用い、RANSなどの定常解析だけでは評価できない自然換気・通風性能について評価した研究は少ない状況である。Hu⁹⁾らは直方体の住宅モデルを対象に風上・風下側壁面の中央部に開口を設けた場合（時間平均的に圧力差が生じる開口条件）と風向に対し平行な両方の壁面の中央部にそれぞれ開口を 1 箇所ずつ設けた場合（時間平均的には圧力差が生じない開口条件）を対象に、LES を用いて室内外気流分布を解析し、時系列的な通風量比やその変動幅について検討を行っており、接近流の変動によって住宅に作用する換気駆動力について言及している。

本研究では、気流変動の定量的予測が可能な LES を使用し、単純住宅モデルを対象に定常解析では圧力差が生じない条件を含んだ 5 パターンの開口条件の解析を行い、建物周辺と建物内部の変動気流場を再現する。更に、得られた瞬時の風速変動による通風気流性状を含んだ数値流体解析結果を基に新たな自然換気・通風性能評価手法を構築し、提案することを目的とする。本報（その 1）ではまず、LES 解析により単純住宅モデルを対象として時間的変動を伴った通風気流性状の数値解析を行う。筆者らは別報¹⁰⁾において本研究と同様の単純住宅モデルを対象として粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry : 以下 PIV) を用いた風洞実験結果を報告している。本報では、この既往の PIV 測定による風洞実験結果と LES 解析結果による室内外通風気流性状の比較を行う。更に、PIV 測定では得ることが困難であった開口面の流入方向風速成分及び無次元静圧の時系列データを LES 解析の結果に基づき分析し、非定常的な通風性状の定量的な検討を行う。これらの解析結果により次報（その 2）では、新たに瞬時の風速変動を考慮することが可能な自然換気・通風性能評価手法の提案を行い、風速変動を考慮した通風性能評価を行った例を報告する。

尚、本論文は既発表文献^{*1) ~ *5)}で報告したものに加筆・修正し、まとめたものである。

2. LES 解析の概要

2.1 解析対象

Fig. 1 に単純住宅モデルの概要を、Table 1 に解析 Case を示す。解析対象は 300[mm] (長さ) × 300[mm] (高さ) × 300[mm] (幅) の立方体形状の単純住宅モデルとする。モデル A-1 では風上側と風下側壁面中央部に、モデル A-2 では風向に対し平行な両方の壁面中央部にそれぞれ開口を 1 箇所ずつ設ける。モデル B-1 では風上側壁面に、モデル B-2 では風下側壁面に、風向に対して対称に開口を 2 箇所設ける。モデル B-3 では風向に対し平行な 1 つの壁面の風上・風下に開口を 2 箇所設ける。どのモデルにおいても開口部の大きさは 40[mm] (高さ) × 40[mm] (幅) とし、地表面から高さ 150[mm] の位置を開口の中心とする。モデル B-1 ~ B-3 では開口同士の間隔は 130[mm] とする。

2.2 LES 解析条件

Table 2 に解析条件^{注2)}を示す。本研究の LES 解析には汎用数値流体解析ソフト STREAM ver. 9 (株)ソフトウェアクリエイドル) を使用す

る。subgrid scale モデル (SGS モデル) は Dynamic 型 Smagorinsky モデルを使用し、等温で解析する。壁面境界条件には Werner-Wengle 型の境界条件¹¹⁾を三層モデルに拡張した条件式¹²⁾注3)を用いる。

2.3 LES 解析のフロー

Fig. 2 に解析領域を、Fig. 3 に住宅モデル近傍のメッシュ分割を示す。解析領域は風洞を模擬する。解析メッシュ分割では対象モデル 1 辺 (300[mm]) を 60 分割、開口面 1 辺 (40[mm]) を 8 分割し、最小メッシュ幅は 5[mm] とした。

本研究の LES 解析では、先ず、開口部が無い単純住宅モデルに対して解析領域の上流部分にドライバー領域を設け、流入変動気流を作成するためのプレ解析を行う。基準とする流入プロファイルは市街地風を想定し、 $U \propto Z^{1/4}$ (U : 流速、 Z : 高さ) とする。基準高さ ($z = 1,000[\text{mm}]$) における流速は 5.0[m/s] である。流入変動気

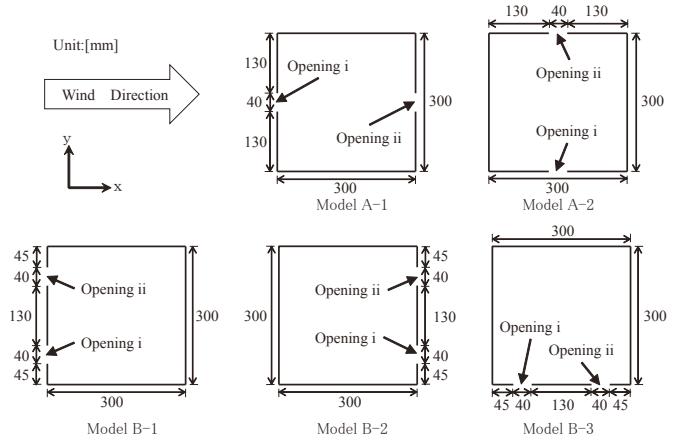


Fig. 1 Simple house model

Table 1 Analysis cases

case	House Model	Openings Position
case1	Model A-1	the windward and leeward walls
case2	Model A-2	the opposite walls parallel to the wind direction
case3	Model B-1	the windward wall
case4	Model B-2	the leeward wall
case5	Model B-3	the wall parallel to the wind direction

Table 2 Analysis conditions

SGS model	Dynamic smagorinsky model				
Analysis region	$x=7.8, y=1.8, z=1.8[\text{m}]$				
Size of house model	$x=0.3, y=0.3, z=0.3[\text{m}]$				
Opening Area	$0.04 \times 0.04 = 0.0016[\text{m}^2]$				
Boundary condition	Inflow	Instantaneous wind velocity components (u, v, w) are produced by driver region calculation ($U \propto Z^{1/4}$, reference wind velocity = 5.0[m/s], reference height = 1000[mm])			
	Out flow	Zero gradient			
Wall Boundary	Side, Top	Free slip			
	Ground	Three layer model of Werner-Wengle wall functions			
	Building wall				
Analysis time	Pre-analysis	2.6[sec]			
	Main analysis	10.0[sec]			
At	0.00001[sec]				
Minimum mesh size	0.005[m]				
Number of meshes	210(x) × 148(y) × 117(z) = 3,636,360				

流の作成方法は片岡ら¹³⁾による、周期境界条件となっているドライバー領域を用いた手法を採用する。この方法では、抽出断面の風速を平均値と変動値に分解し、変動値のみをリサイクルする。その為、平均速度プロファイルを崩すことなく流入変動気流^{注4)}を作成できる。プレ解析は解析開始時刻 ($t=0[\text{s}]$) から $t=2.6[\text{s}]$ まで行う。プレ解析に続き、開口を有する単純住宅モデルを解析領域に置いた解析（本解析）を行う。 $t=2.6[\text{s}]$ から $t=4.6[\text{s}]$ 間はモデル開口部を開放してから室内気流分布が形成されるまでの移行期間としてデータを破棄し、 $t=4.6[\text{s}]$ から $t=14.6[\text{s}]$ まで、計 $10.0[\text{s}]$ 間を本解析の結果として用いる。

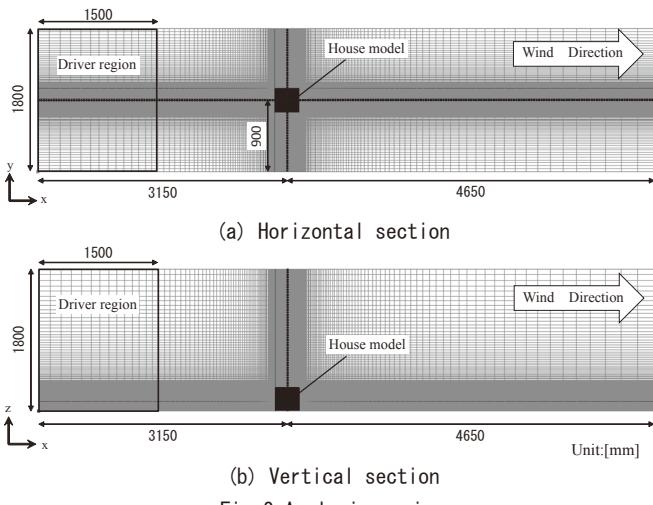
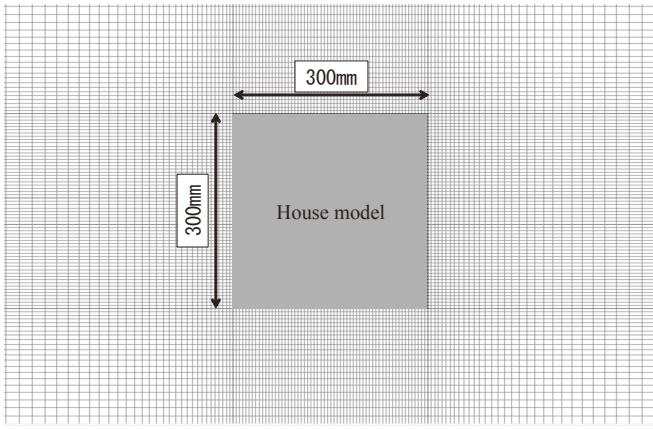
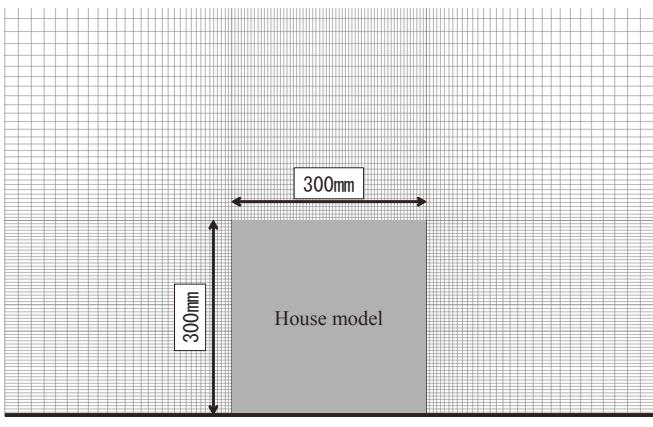


Fig. 2 Analysis region



(a) Horizontal section



(b) Vertical section

Fig. 3 Analysis mesh division of vicinity of house model

3. LES 解析結果

Fig. 4 に流入変動気流の x 方向の平均風速比分布と乱流エネルギーの鉛直プロファイル（ドライバー領域下流端部： $x=1,500[\text{mm}]$ ）を示す。 x 方向の平均風速比分布は基準とした $U \propto Z^{1/4}$ の鉛直プロファイルとほぼ一致する。乱流エネルギーの鉛直分布では、風洞実験値と比較して全体的に小さい値となっており、軒高 ($Z=300[\text{mm}]$) では風洞実験値と比較して約 45 ~ 80% となる。軒高における y 及び z 方向風速成分の変動量の RMS 値は基準風速 (5.0m/s) に対して約 5% である。Case1において対象モデル外壁面における壁面からの無次元化距離 y^+ の平均値は約 15 である。

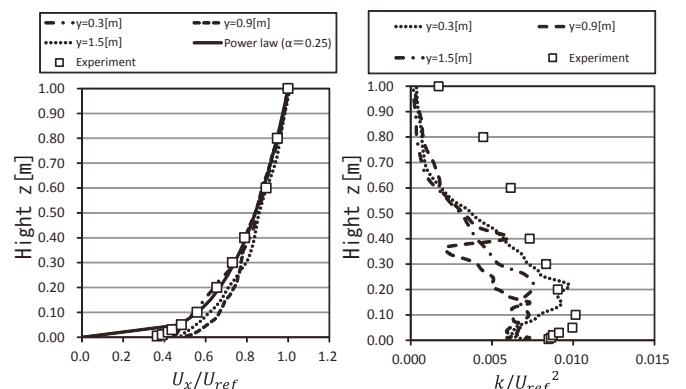
本報のベクトル図は全て基準高さ 1,000 [mm] の風速 5.0 [m/s] (U_{ref}) で基準化した風速比として示す。又、室内風速は室外風速と比較して遅いため、室内風速比の凡例を室外風速比の 2 倍として示す。

3.1 風洞実験による PIV 測定結果と LES 解析結果の比較

Fig. 5 に平均室内外流速分布の比較 (Case1、鉛直断面)^{注5)} を示す。PIV 测定とは、流れに追従する微細なトレーサ粒子を流れ場に散布してレーザシートにより可視化を行い、ハイスピードカメラ等により取得した連続する二時刻間の流れ場の画像を解析することで、流れ場の速度分布を非接触で測定する技術の総称である。筆者らは別報¹⁰⁾にて本報と同様の寸法、開口条件の単純住宅モデルを対象に大型境界層風洞を用いて PIV 测定を行った結果を報告している。詳しい実験条件、方法等は別報を参照されたい。

既往の PIV 测定結果と LES 解析結果を比較すると、モデル室外では風上側外壁面の上流の地表面付近に形成される渦及び屋根面の剥離域内の渦で大きさ、位置ともにほぼ一致している。モデル室内では、両結果ともに風上側の開口部から気流が斜め下向きに流入し、風下側開口部から斜め上向きに気流が流出する様子が捉えられている。但し、建物モデル内の主流の流入角度は PIV 测定結果の方が大きく傾斜している。一方、流出気流では PIV 测定結果は流出角度が比較的上向きとなる傾向があり、LES 解析結果では直線的に後流域へ流出後に上昇する傾向がある。これらの気流性状の不一致の原因としては、Fig. 4 (a)において、LES 解析結果では流入変動気流の地表面付近の風速が風洞実験結果と比較して速いこと、同 (b)において、乱流エネルギーが風洞実験結果と比較して LES 解析結果では小さいことが考えられる。

本研究で用いた単純住宅モデルを対象とした場合、室内外気流性状は PIV 测定と LES 解析で定性的に概ね一致しており、流れ場の基本的な構造は再現されているため、LES 解析により通風性能評価対象とす

(a) Wind velocity of x component (b) Turbulent kinetic energyFig. 4 Approaching wind profile ($x=1,500[\text{mm}]$)

る風洞実験を定性的に再現することが出来たと考えられる。

3.2 LES 解析による室内外風速比分布

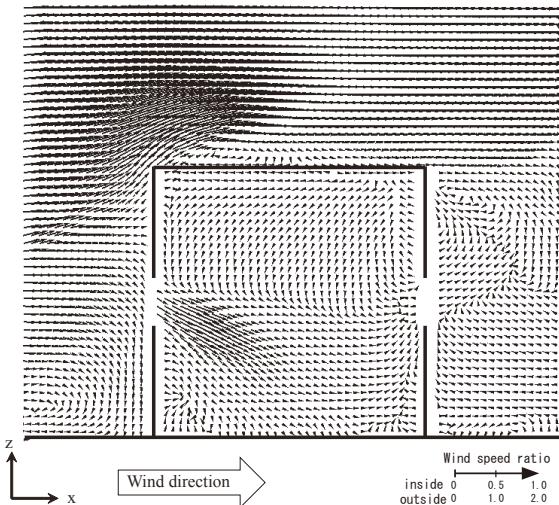
Fig. 6～10 に各 Case の室内外風速比分布を示す。

3.2.1 風上側と風下側に開口を有する場合 (Case1)

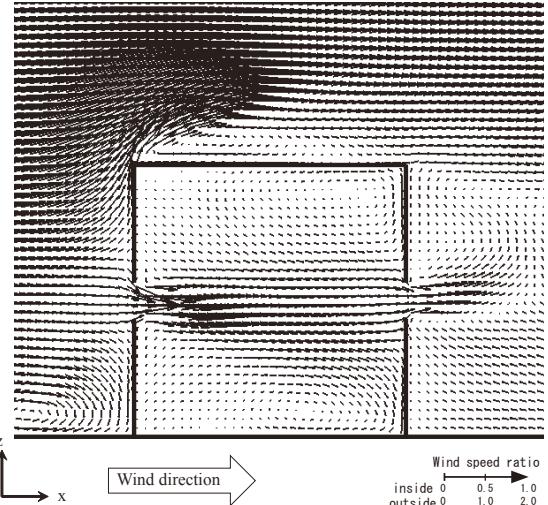
Fig. 6(c) の平均室内外風速比分布では、風上側の開口 i から風下

側の開口 ii まで直線的な流れ場が生じている。室内には主流を軸として概ね対称的な渦を形成する流れ場が生じる。流入風速比は 0.4 度となる。

瞬時室内外風速比分布では、Fig. 6(a) においては開口 i から風速比 0.6 度で y 正方向へ流入しているが、Fig. 6(b) では開口 i から

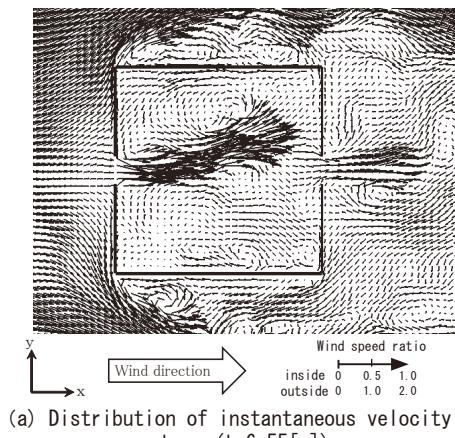


(a) Distribution of velocity vectors by wind tunnel experiment using particle image velocimetry (PIV)

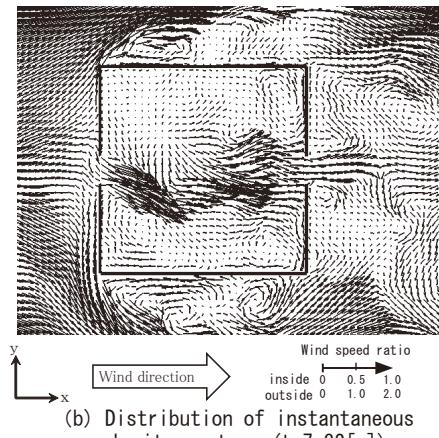


(b) Distribution of velocity vectors using LES

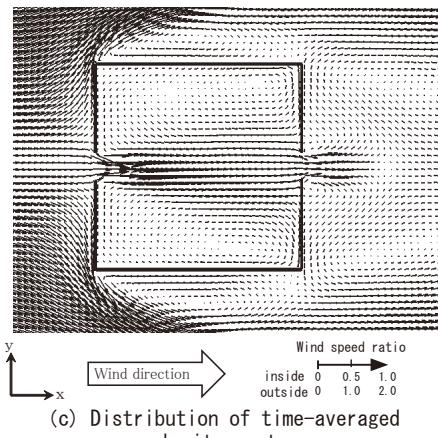
Fig. 5 Comparison of distribution of time-averaged wind speed ratio vectors (Case1, Vertical section)



(a) Distribution of instantaneous velocity vectors ($t=6.55[\text{s}]$)

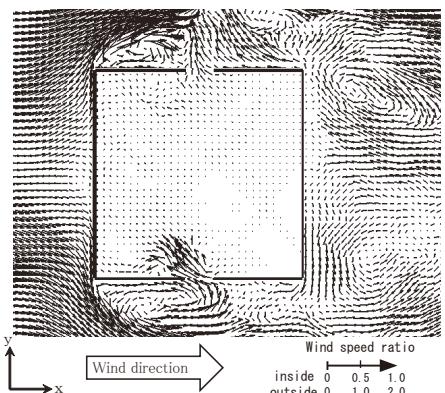


(b) Distribution of instantaneous velocity vectors ($t=7.32[\text{s}]$)

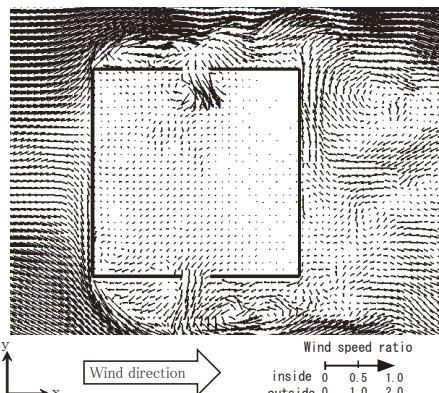


(c) Distribution of time-averaged velocity vectors

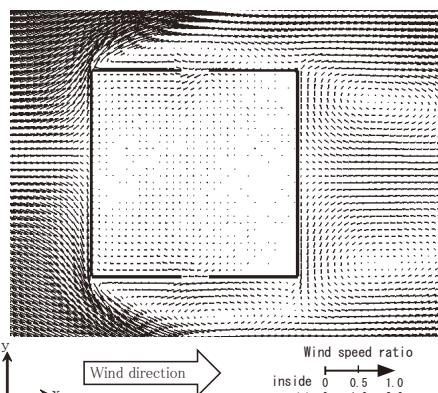
Fig. 6 Distribution of air flow wind speed ratio vectors by LES (Case1, Horizontal section)



(a) Distribution of instantaneous velocity vectors ($t=6.96[\text{s}]$)



(b) Distribution of instantaneous velocity vectors ($t=7.84[\text{s}]$)



(c) Distribution of time-averaged velocity vectors

Fig. 7 Distribution of air flow wind speed ratio vectors by LES (Case2, Horizontal section)

風速比 0.6 程度で y 負方向へ流入しており、外部風の変動により瞬時に y 方向に振動しながら流入している。又、流入した気流は室内風下側隅角部で渦を生じさせる。モデル周辺では外壁側面付近で剥離流が生じ、逆流が生じている。

3.2.2 風向に対し平行な両壁面に開口を有する場合 (Case2)

Fig. 7(c) の平均室内外風速比分布では、開口部から室内に気流の流入は殆ど生じない。室内風速比分布では概ね風速比 0.1 以下の流れ場となる。

瞬時室内外風速比分布は、Fig. 7(a) では図下部に位置する開口 i から風速比 0.4 程度で気流が室内へ流入している。それに対し、Fig. 7(b) では図上部に位置する開口 ii から風速比 0.4 程度で流入しており、開口 i と開口 ii に交互に気流が流入している。モデル周辺では Case1 と同様に外壁側面付近で剥離流が生じ、逆流が生じている。

3.2.3 風上側壁面に對称に 2 開口を有する場合 (Case3)

Fig. 8(c) の平均室内外風速比分布では、モデル室内に気流は殆ど流入しない。室内風速比分布では Case2 と同様に概ね風速比 0.1 以

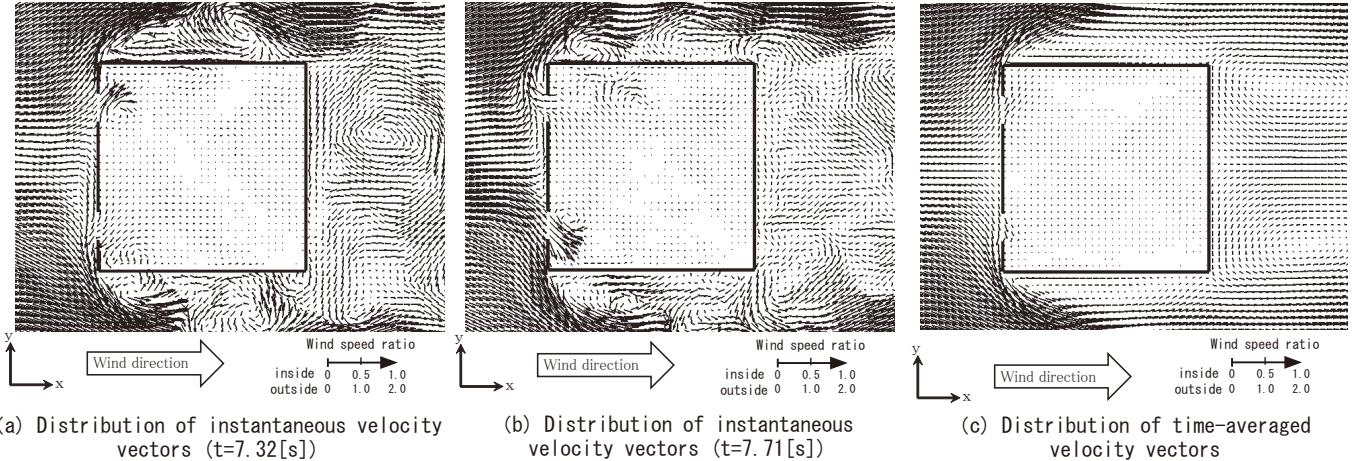


Fig. 8 Distribution of air flow wind speed ratio vectors by LES (Case3, Horizontal section)

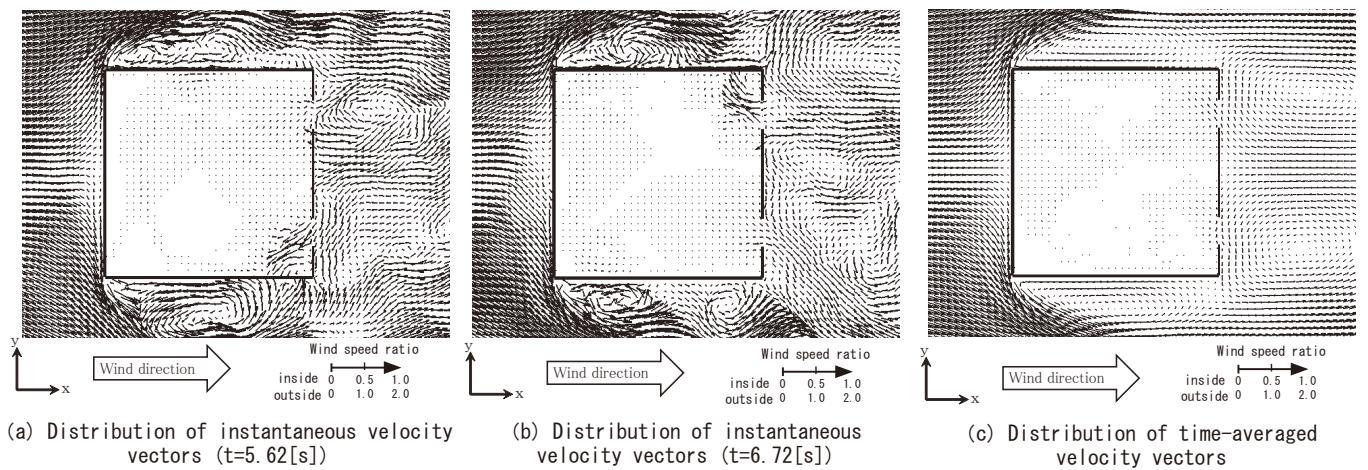


Fig. 9 Distribution of air flow wind speed ratio vectors by LES (Case4, Horizontal section)

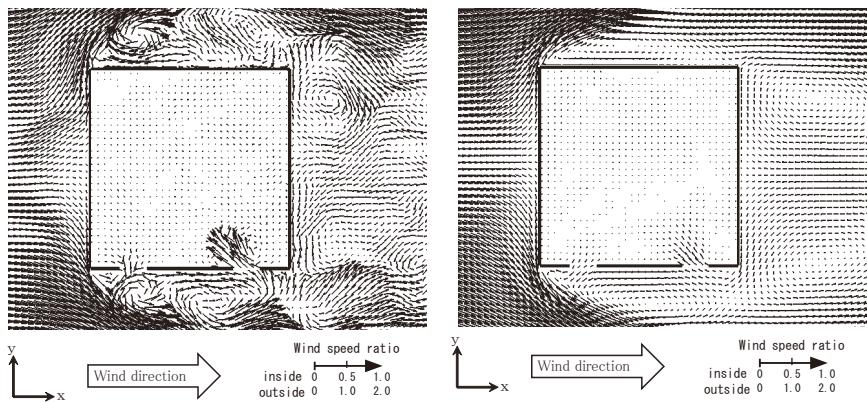


Fig. 10 Distribution of air flow wind speed ratio vectors by LES (Case5, Horizontal section)

下の流れ場となる。

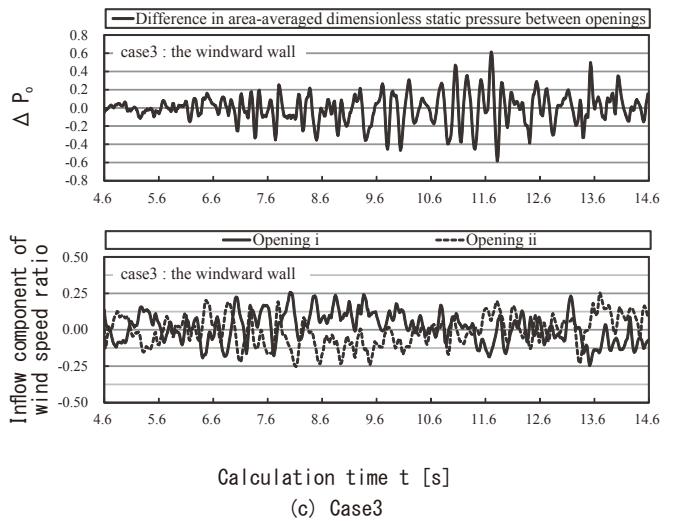
瞬時室内外風速比分布は、Fig. 8(a) では風向に向かって右側に位置する開口 ii から風速比 0.4 程度で気流が流入している。それに対し、Fig. 8(b) では風向に向かって左側に位置する開口 i から風速比 0.4 程度で流入しており、開口 i と開口 ii に交互に気流が流入する。又、流入した気流は室内風下側隅角部で渦を生じさせている。モデル周辺では、Case1, 2 と同様に外壁側面付近で剥離流が生じ、逆流が生じている。

3.2.4 風下側壁面に対称に2開口を有する場合 (Case4)

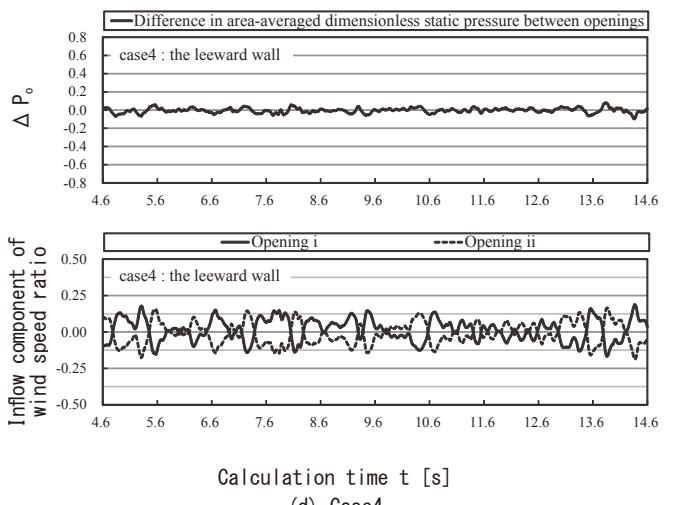
Fig. 9(c) の平均室内外風速比分布ではモデル室内に気流は殆ど流

入しない。室内風速比分布では Case2, 3 と同様に概ね風速比 0.1 以下の流れ場となる。

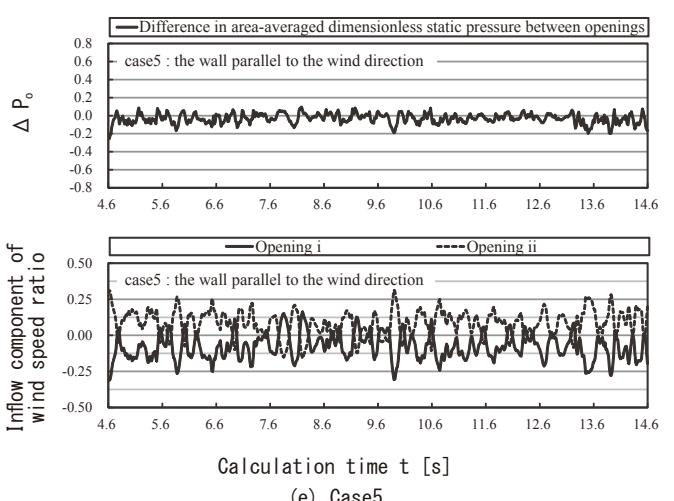
瞬時室内外風速比分布は、Fig. 9(a) では図下部に位置する開口 i から風速比 0.3 で気流が流入する。それに対し、Fig. 9(b) では図上



Calculation time t [s]
(c) Case3



Calculation time t [s]
(d) Case4



Calculation time t [s]
(e) Case5

Fig. 11 Difference in area-averaged dimensionless static pressure between openings and inflow component of wind speed ratio at each opening

部に位置する開口 ii から風速比 0.3 程度で流入しており、開口 i と開口 ii に交互に気流が流入する。モデル周辺では外壁側面付近で剥離流が生じ、逆流が生じている。

3.2.5 風向に対し平行な 1 つの壁面に開口を 2箇所所有する場合 (Case5)

Fig. 10(b) の平均室内外風速分布では、風向に対して平行な 1 壁面の風上、風下に設けた 2 箇所の開口の内、風下側の開口 ii から風速比 0.2 程度で気流が流入し、モデル内部を循環する流れ場を形成する。Fig. 10(a) では瞬時流入風速比は 0.5 程度であり、気流は開口部が存在する内壁面に沿って流入する。モデル内部では室内全体で複雑な気流場を形成する。モデル周辺では、外壁側面付近で剥離流が生じ、逆流が生じている。

3.3 時間平均化した風速分布による室内流入量と瞬時風速分布による時間平均室内流入量の比較

Table 3 に平均風速分布による基準化室内流入量と瞬時風速分布による時間平均基準化室内流入量^{注6)}の比較を示す。時間平均化した風速分布による室内流入量は、予め時間平均化を施した室内外流速ベクトル分布を対象に各開口において開口面法線方向の室内流入方向成分の風速を抽出し、室内流入量を算出した値である。一方、瞬時風速分布による時間平均室内流入量は、各時刻の瞬時風速ベクトル分布を対象に各開口において開口面法線方向の室内流入方向成分の風速を抽出して瞬時室内流入量を算出した後、時間平均化を施した値である。尚、Table 3 はモデル軒高におけるアプローチフローの流速 (3.859m/s : 基準高さ 300 mm) とモデル開口面積 (40 mm × 40 mm) により、基準流量を $3.859 \times 40 \times 40 = 22.23[\text{m}^3/\text{h}]$ とし、この値で各流入量を除すことで基準化して示す。

時間平均的にも通風により流入気流が生じ、明確な室内気流分布が形成される Case1 では時間平均化した風速分布による室内流入量と瞬時風速分布による時間平均室内流入量がほぼ一致する。一方、時間平均的には流入気流が殆ど観察されない Case2、3、4 では、瞬時風速分布による時間平均室内流入量は平均風速分布による室内流入量に対して、Case2 では約 7 倍、Case3 では約 27 倍、Case4 では約 5 倍となる。又、通風が得にくい開口条件であるが、時間平均的にも流入気流が観察される Case5 では約 1.4 倍となる。外部風の風速変動によって通風が生じる開口条件の下では、時間平均的な解析による換気・通風量の算出を行った場合、実際の通風現象によって得られる通風量と比較して大きく過小評価されると考えられる。

3.4 開口間の平均無次元静圧差及び開口面平均風速比の流入方向成分の時系列変化

Fig. 11(a) ~ (e) に、それぞれ Case1 ~ 5 の開口間の平均無次元静圧差^{注7)} 及び開口面平均風速比の流入方向成分の時系列変化を示す。各開口面での無次元静圧差及び風速比の流入方向成分は各開口面内で空間平均した値^{注8)} である。風速比は流入方向を正として表示する。Case2、3、4 は、風向に対して対称な位置に開口を設置しており、時間平均的には通風が得られない開口条件である。

Case2、3、4 では絶えず瞬間に変化する外部風速の影響により、開口間に瞬時の無次元静圧差が生じる。又、無次元静圧差は非定常に正負が変化しており、Case2 では概ね +0.15 ~ -0.15、Case4 では概ね +0.1 ~ -0.1 となる。Case3 では Case2、4 と比較して無次元静圧差が時間的に大きく変化し、最大で約 +0.6 ~ -0.6 となる。Case5 では、概ね負の無次元静圧差で約 -0.1 ~ -0.2 となっ

ている。これは風下側開口 (開口 ii) の方が風上側開口 (開口 i) と比較してほぼ定常に正の無次元静圧となるためである。

風速比の流入方向成分においては、Case1 では気流は風速比 0.4 程度で風上側開口から定常に流入し、流入・流出開口が変化していないことがわかる。Case2、3、4 においては、概ね +0.3 ~ -0.3 で変化し、非定常に流入方向風速成分の正負が入れ替わり、流入・流出開口の関係が変化している。Case3 では無次元静圧差では他の Case と比較して大きいものの、流入方向風速成分では他の Case とほぼ同様の値となっている。Case5 では、Case1 と比較して流入風速比に時間的变化があるが、概ね開口 ii から最大で風速比 0.3 程度で流入し、開口 i から流出する。

LES を用いることで、定常的には通風を得られない開口条件であっても、瞬時的な圧力差に起因する通風現象を再現できる。

4.まとめ

本報では LES 解析を用いて風洞実験を模擬した単純住宅モデルの室内外通風性状の解析を行った。更に時間平均的には開口間に圧力差が生じず、通風が得にくいとされる開口条件を含んだ 5 パターン住宅モデルを対象とした解析を行い、外部風の風速変動によって瞬時に生じる開口間の圧力差による通風性状の把握・検討を行った。通風気流性状は風洞実験結果と定性的に概ね一致しており、気流の基本的な構造は再現できているため、LES 解析により通風性能評価対象とする風洞実験の再現が出来たと考えられる。以下が本報で得られた知見である。

- ① Case1 では定常に風上側の開口 i から風速比 0.4 程度で流入し、風下側の開口 ii から流出する。時間平均的には風上側開口から風下側開口まで直線的な流れ場が生じているが、瞬時に y 方向に振動しながら流入する。
- ② Case2 では時間平均的にはモデル室内に気流は殆ど流入しない。瞬時に開口 i と開口 ii には最大で約 0.15 の無次元静圧差が生じる。瞬時流入気流は最大で風速比 0.4 程度となり、流入・流出開口が非定常に変化する。
- ③ Case3 では時間平均的にはモデル室内に気流は殆ど流入しない。開口 i と開口 ii には Case2、4 と比較して大きく、瞬時に最大約 0.6 の無次元静圧差が生じる。しかし、瞬時流入気流の風速比は Case2、4 とほぼ同様に最大で風速比 0.4 程度となる。流入・流出開口は非定常に変化する。又、流入した気流は室内風下側隅角部で渦を生じさせている。
- ④ Case4 では時間平均的にはモデル室内に気流は殆ど流入しない。瞬時に開口 i と開口 ii には最大で約 0.1 の無次元静圧差が生じる。瞬時流入気流は最大で風速比 0.3 程度となり、流入・流出開口は非定常に変化する。
- ⑤ Case5 では定常に開口間の無次元静圧差が 0.15 程度となり、流入・流出開口は殆ど変化しない。気流は風下側の開口 ii から流入し、瞬時流入気流は最大で風速比 0.5 程度となる。流入した気流はモデル内部で循環する流れ場を形成し、風上側の開口 i から流出する。
- ⑥ 瞬時風速分布による時間平均室内流入量は時間平均化した風速分布による室内流入量に対して、Case1 ではほぼ一致するが、Case2 では約 7 倍、Case3 では約 27 倍、Case4 では約 5 倍、Case5 では約 1.4 倍の差が生じる。

5. 今後の展望

室内換気性能を評価する指標に空気齢や空気余命等^{14), 15)}がある。これらの換気性能評価指標は、流入空気が室内の各点に至るまでの無数の流管のアンサンブル平均によりモデル化されている。しかし本報のCase2、3、4などの時間的に流入・流出開口の位置関係が変化し、流れの構造が時間的に大きく変化する流れ場では、空気齢等の濃度応答の時間積分に基づく換気性能評価指標による評価が困難と考えられる。一方、汚染質除去効率などの濃度分布に基づく換気性能評価方法を用いた場合、Case3、4、5においては開口から離れた局所領域でトレーサ（汚染質等）を発生させ、その除去効率を求めるこにより、流入気流がショートサーキットして十分に室内に到達しない場合を考慮した換気性能評価を行うことが可能であると考えられる。しかし、Case2の場合、汚染質除去効率による換気性能評価方法では、室内に汚染質を一様発生させた場合も、局所領域を設定して汚染質を発生させた場合も、各開口から流入した気流が局所領域に到達せずにショートサーキットを形成して流出する気流の割合を算出することが困難と考えられる。Fig. 12にCase2における汚染質除去効率を用いた通風性能評価の問題点を示す。これはCase2の場合、流入気流の到達深度の判定方向が気流の流入した開口によって異なるため、流入開口別にショートサーキットを判断できる位置に汚染質発生領域を設定することが困難なため

When evaluating the ventilation performance using pollutant removal efficiency (e.g. Purging Flow Rate), it is difficult to consider the influence of the short circuit with the case that the inflow and outflow openings are changing constantly.

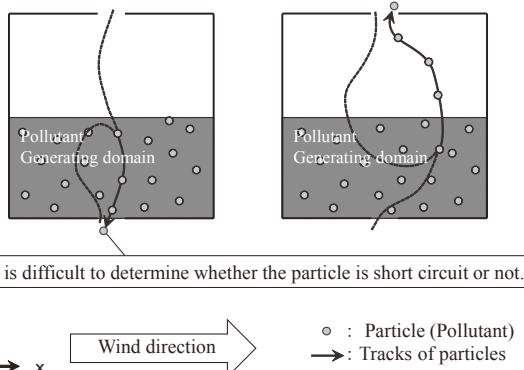


Fig. 12 Problem of evaluation method using pollutant removal efficiency for cross-ventilation performance in Case2

The influence of the short circuit is removed by counting number of particles which sprinkled on the openings and arrived at the evaluation domain.

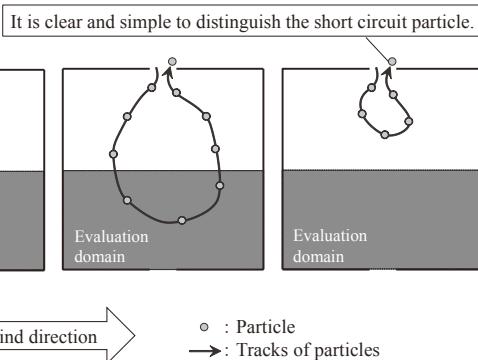


Fig. 13 Concept of evaluation method of natural and cross-ventilation performance in unsteady fluctuating flow

である。このため、このような開口条件にも適用可能な通風の時間的変動を考慮した新たな自然換気・通風性能評価手法を開発する必要がある。

Fig. 13 に新たに提案する風速変動を考慮した自然換気・通風性能評価手法の概念を示す。新たな評価手法としては、例えば、新鮮空気の到達深度を念頭に室内に仮想の領域として換気性能評価領域を定義し、開口部からの流入気流に追従する重さ・大きさのない粒子を多時刻に渡って開口面上の多数の位置で散布し、粒子の位置を追跡することで散布した粒子の室内流入粒子数に対する評価領域に到達した粒子数の割合により新鮮空気の内、室内の換気に寄与する空気量を算出する手法が考えられる。本報の3.3で算出した2種類の換気量はどちらも開口面の流入流速により算出した室内流入量であり、室内でどのような換気経路が形成されるかは考慮していない。新たな評価手法では、流入した空気が十分に換気に寄与せずに開口から流出するショートサーキットを考慮し、粒子追跡によって室内に流入した空気量の内、室内の換気に寄与した比率を算出して自然換気・通風量の評価を行う。この評価手法については、次報（その2）で報告する。

尚、本論文に関するLES解析によって得られた時系列室内外瞬時風速分布は、本稿末尾に記載するURLから動画として参照できる。

参考文献

- 小林知広、相良和伸、山中俊夫、甲谷寿史、武田尚吾、西本真道：通風時の建物周辺気流に関する風洞実験及びCFD解析精度の検証、日本建築学会環境系論文集、No. 638, pp. 481-488, 2009. 4.
- 後藤伴延、大場正昭、倉渕隆、遠藤智行、赤嶺嘉彦、野中俊宏、塚本健二：流出開口部への局所相似モデルの適用に関する検討 通風時の換気量予測法に関する研究、第3報、日本建築学会環境系論文集、No. 674, pp. 259-266, 2012. 4.
- 西澤繁毅、繪内正道、羽山広文、森太郎：流れの時間スケールを考慮した換気・通風空間のむらの評価指標とマクロモデルへの展開、日本建築学会環境系論文集、No. 576, pp. 29-36, 2004. 2.
- 佐藤鑑：風向に対し同一側の二開口部による換気輪道について、建築学会論文集、No. 5, pp. 241-250, 1937. 3.
- 富永禎秀、黒沢広大：単体立方体モデル周辺の汚染質拡散を対象としたRANSとLESの比較 CFDによる建物近傍の汚染質拡散の予測精度に関する研究 その2、日本建築学会環境系論文集、No. 646, pp. 1307-1313, 2009. 12.
- 狭間貴雅、加藤信介、大岡龍三：LESを用いた单一開口を有する系における空気流入出特性の基礎的検討 単一開口における空気流入出メカニズムの解明 その1、日本建築学会環境系論文集、No. 617, pp. 17-24, 2007. 7.
- 倉渕隆、大場正昭：風洞実験とLESを併用した通風時の乱流構造解明に関する研究 3、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 645-646, 2001. 9.
- 倉渕隆、大場正昭、遠藤智行：様々な風向角度の場合の通風気流に関する予測精度検証と流管分析 LESと風洞実験による建物通風気流構造の解明に関する研究、第2報、日本建築学会環境系論文集、No. 591, pp. 7-13, 2005. 5.
- Cheng-Hu Hu, Masaaki Ohba, Ryuichiro Yoshie: CFD modelling of unsteady cross ventilation flows using LES, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, No. 96, pp. 1692-1706, 2008. 4.
- 有波裕貴、赤林伸一、高野康夫、富永禎秀、坂口淳：大型境界層風洞内における単純住宅モデルを対象とした風速変動による通風気流の可視化及び解析結果 室内気流を対象としたPIV計測に関する研究 その2、日本建築学会環境系論文集、No. 708, pp. 127-137, 2015. 2.
- H. Werner, H. Wengle: Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow Over and Around a Cube in a Plate Channel, Selected Papers from the Eighth International Symposium on Turbulent Shear Flows, pp. 155-168, Munich, Germany, September 9-11, 1991.
- 株式会社ソフトウェアクリエイドル: STREAM ver.9 ユーザーズガイド基礎

- 編, pp2-45, 2011.7.
- 13) 片岡浩人, 水野稔: 流入変動風を用いた三次元角柱周りの気流解析, 日本建築学会計画系論文集, No.523, pp.71-77, 1999.30.
- 14) M. Sandberg: What is Ventilation Efficiency?, Building and Environment, Vol.16, No.2, pp123-135, 1981.
- 15) 村上周三, 加藤信介: 新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法 換気効率の評価モデルに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.32, 1986.10.

本論文に関連する既発表文献

- *1) 赤林, 坂口, 富永, 有波, 本田:LESによる住宅の通風性状に関する研究
その1 標準k-εモデルとLESによる住宅の気流性状の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 41291, pp.581-582, 2013.8.
- *2) 本田, 赤林, 坂口, 富永, 有波:LESによる住宅の通風性状に関する研究
その2 同一壁面に複数の開口部を有する単純住宅モデルの気流性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 41292, pp.583-584, 2013.8.
- *3) 赤林, 坂口, 富永, 高野, 有波:LESによる戸建住宅の通風性状に関する研究 その1 単純住宅モデルを対象とした変動気流による室内外気流性状の解析, 日本建築学会北陸支部研究報告集, NO.57, 4-13, pp.282-285, 2014.7.
- *4) 高野, 赤林, 坂口, 富永, 有波:LESによる戸建住宅の通風性状に関する研究 その2 風速変動を考慮した自然換気・通風性能評価方法の提案, 日本建築学会北陸支部研究報告集, NO.57, 4-13, pp.286-289, 2014.7.
- *5) 高野, 赤林, 坂口, 富永, 有波:変動気流場における住宅の自然換気・通風に関する研究 その2 Large-Eddy Simulation(LES)による変動気流を考慮した自然換気・通風性能評価手法の提案, 日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集, 41389, pp.811-814, 2014.9.

本論文に関連したLES解析結果の連続するベクトル画像のURL

http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/dougainfo/journal/les2014_1/les2014_1.html

注

注1) 実際の通風現象では、外部風の瞬時の風速の変動と共に主風向の変化が存在するが、本報では主に風速変動による瞬時の風圧力差によって生じる室内外通風気流性状の把握・検討を目的としているため、解析対象モデルに対する主風向の角度は一定とする。今後の展望としては主風向のモデルに対する角度を15度、30度、45度とすることや周期的に流入風向を変化させることができます。

注2) 本研究のLES解析では静圧の基準点は(x, y, z)=(1, 1, 1)としている。

注3) Werner-Wengeler型の条件式を以下の式によって三層モデルに拡張して使用する。

$$u^+ = y^+ \quad (y^+ \leq y_{c1}^+) \quad (1)$$

$$u^+ = A_1(y^+)^{B1} \quad (y_{c1}^+ \leq y^+ \leq y_{c2}^+) \quad (2)$$

$$u^+ = A_2(y^+)^{B2} \quad (y_{c2}^+ \leq y^+) \quad (3)$$

$$y_{c1}^+ = A_1^{1/(B_1 - B_2)} \quad (4)$$

$$y_{c2}^+ = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{1/(B_1 - B_2)} \quad (5)$$

$$u^+ = \left(\frac{u^+}{\sqrt{\tau_w}} \right) \quad (6)$$

$$y^+ = \sqrt{\tau_w} \frac{y}{v} \quad (7)$$

$$A_1 = 2.7, A_2 = 8.6, B_1 = \frac{1}{2}, B_2 = \frac{1}{7}$$

注4) 初期条件として以下の式を用い、解析領域内に初期速度を与えていた。

$$u = u_{inlet} + u_{amp} \times Rand_u \quad (8)$$

$$v = v_{inlet} + v_{amp} \times Rand_v \quad (9)$$

$$w = w_{inlet} + w_{amp} \times Rand_w \quad (10)$$

u, v, w : initial wind velocity[m/s]

$u_{inlet}, v_{inlet}, w_{inlet}$: initial value of wind velocity [m/s]

$(u_{inlet} = 0[m/s], v_{inlet} = 0[m/s], w_{inlet} = 0[m/s])$

$u_{amp}, v_{amp}, w_{amp}$: Amplitude of flow velocity component[m/s]

$(u_{amp} = 1.0[m/s], v_{amp} = 3.0[m/s], w_{amp} = 3.0[m/s])$

$Rand_u, Rand_v, Rand_w$: Random numbers (-1.0 to 1.0)

注5) PIV測定結果はグラフソフト(GraphR ver.2.32)によって図化し、LES解析結果は本研究で使用した汎用数値流体解析ソフトウェアSTREAMのPOST処理ソフトによって図化しているため、図中のベクトルの表現が若干異なる。

注6) 瞬時風速分布による時間平均室内流入量は以下の式により算出を行う。

$$\overline{Q_{in}} = \frac{1}{T} \int_0^T Q_{in}(t) dt \quad (11)$$

$$Q_{in}(t) = \int_A v_m(t) dA_m \quad (12)$$

$$v_m(t) = \begin{cases} v_m(t) & v_m(t) > 0 \text{ (inflow)} \\ 0 & v_m(t) \leq 0 \text{ (outflow)} \end{cases} \quad (13)$$

m : Mesh number at opening

$\overline{Q_{in}}$: Time-averaged flow rate at opening [m³/h]

$Q_m(t)$: Instantaneous flow rate at each mesh [m³/h]

$v_m(t)$: Instantaneous wind velocity at each mesh [m/s]

A_m : Mesh area at opening [m²]

A : Opening area [m²]

T : Averaging time [s]

t : Calculation time [s]

注7) 各時刻における開口間の平均無次元静圧差は以下の式により算出を行なう。

$$\Delta P_o = \langle P_o \rangle_i - \langle P_o \rangle_{ii} \quad (14)$$

$$P_o = \frac{P_s}{P_{ref}} \quad (15)$$

$$P_{ref} = \frac{\rho}{2} U_{ref}^2 \quad (16)$$

i : Opening i

ii : Opening ii

P_o : Dimensionless static pressure [-]

$\langle P_o \rangle$: Area-averaged dimensionless static pressure at each opening [-]

P_s : static pressure [-]

P_{ref} : Reference dynamic pressure [-]

ρ : Air density [kg/m³]

U_{ref} : Reference wind velocity [m/s]

注8) 各開口面は $8 \times 8 = 64$ メッシュで構成されており、平均値は 64 メッシュの空間平均値である。今回の開口条件では一つの開口面内で気流の流入・流出が同時に発生することは確認されなかったため、各開口面内における空間平均値を示す。

ANALYSIS OF CROSS VENTILATION AIRFLOW IN AND AROUND
SIMPLE HOUSE MODEL CONSIDERING FLOW FLUCTUATION
Study on naturally cross-ventilated house using large-eddy simulation(LES) part 1

*Yasuo TAKANO * , Shin-ichi AKABAYASHI ** , Yoshihide TOMINAGA *** ,
Jun SAKAGUCHI**** , Miho HONDA ***** and Yuki ARINAMI **

* Grad. Stud., Graduate School of Science and Technology, Niigata University, M. Eng.

** Prof., Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Dr. Eng.

*** Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Niigata Institute of Technology, Dr. Eng.

**** Prof., Faculty of International Studies and Regional Development, Department of International
Studies and Regional Development, University of Niigata Prefecture, Dr. Eng.

***** Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency, M. Eng.

(Former Grad. Stud., Graduate School of Science and Technology, Niigata University)

Natural cross ventilation in house is commonly used as natural ventilation method during moderate seasons, including summer in Japan. It is complex phenomena, influenced by wind direction, distribution of wind velocity, and total pressure on walls. In previous study, a steady-state flow field in a simple house model installed two openings on each opposite wall has been studied. Cross ventilation is not observed with using Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation (RANS), nevertheless occurs in actual phenomena. Practically, the steady-state flow field in the house is not maintained over time, and flow field varies depending on fluctuating wind. For example, cross ventilation is affected by the wind turbulence around house, in case of two openings positioned symmetrically on opposite walls parallel to wind direction. In this case, instantaneous pressure difference between two openings makes natural cross ventilation in the house. Therefore, replicating actual phenomena with using Computational Fluid Dynamics (CFD) is very important to provide evaluation method for ventilation design. Recently, unsteady fluid flow phenomena are analyzed with using Large-Eddy Simulation (LES).

In this study, opening conditions and wind direction are calculation variables, simple house models are analyzed in order to survey unsteady cross ventilation phenomena using LES. Sub-grid scale model is Dynamic Smagorinsky model. The airflow computation results about cross-ventilated house are reported.

The results are as follows:

- (1) In Case 1, a liner fluid flow field is produced from the windward opening to the leeward opening shown in mean air flow velocity. Instantaneous inflow occurs on the amplitude state for the y-direction. Moreover, turbulence occurs in the corner of inside.
- (2) In Case 2, 3, and 4, inflow is not observed in mean air flow velocity. On the other hand, instantaneous inflow is generated by turns at each opening.
- (3) In Case 5, in mean air flow velocity, inflow occurs on the leeward opening and the circulation flow field inside the house model occurs by inflow.
- (4) Comparing inflow calculated by time-averaged airflow and instantaneous airflow, inflow calculated by instantaneous airflow is about 7 times more in case2, 27 times more in case3, 5 times more in case4 and 1.4 times more in case5 than inflow calculated by time-averaged airflow respectively.
- (5) The ventilation under opening conditions that can obtain no-ventilation in steady-state flow field is replicated with using LES.

Some evaluation methods for ventilation efficiency (ex. age of air) are defined on ensemble average of innumerable stream tubes. Therefore, it is difficult to evaluate natural cross ventilation under these conditions. In next study, we will aim to develop a new evaluation method for ventilation efficiency.

Outline of new evaluation method is as follows:

- (1) Defining evaluation area in the simple house model as excluding short-circuit phenomenon.
- (2) Sprinkling imaginary particles that have no-weight and no-volume from appropriate openings intermittently.
- (3) Integrating amount of particles that arrive at the evaluation area.
- (4) The arriving rate and effective ventilation are computed by the amounts of particles arrived at evaluation area.
- (5) Calculating the ratio of effective ventilation against air quantity of ventilation in Case1 as standard.

In addition, the vector animation about this study is referred the URL below:

http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/dougainfo/journal/les2014_1/les2014_1.html

(2015年1月9日原稿受理、2015年6月22日採用決定)