

風速変動を考慮した自然換気・通風性能評価手法の提案

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2

PROPOSAL OF AN EVALUATION METHOD FOR NATURAL CROSS-VENTILATION
PERFORMANCE CONSIDERING FLOW FLUCTUATION

Study on naturally cross-ventilated house using large-eddy simulation(LES) part 2

有波 裕貴*, 赤林 伸一**, 富永 禎秀***,

坂口 淳****, 高野 康夫*****, 本田 美穂*****

Yuki ARINAMI, Shin-ichi AKABAYASHI, Yoshihide TOMINAGA,

Jun SAKAGUCHI, Yasuo TAKANO and Miho HONDA

The driving force behind natural cross-ventilation is outdoor wind. The indoor airflow distribution and flow rate under cross-ventilation vary greatly because the direction and velocity of wind changes constantly. Thus, cross-ventilation is said to be an unsteady fluid phenomena. Therefore, replicating actual fluid phenomena using computational fluid dynamics is very important for evaluating the unsteady cross-ventilation performances of houses. Recently, unsteady fluid phenomena have been analyzed by using large-eddy simulation. In this study, a new evaluation method that considers flow fluctuation for natural cross-ventilation is proposed. According to this method, particles are released at openings and the ratio of particles arriving at the evaluation area of a house model is calculated. The method sets inner half part over the central plane of the model as the evaluation area to exclude short circuit phenomena. Ratio of particles entering into the model, ratio of particles arriving at the evaluation area, effective ventilation rate and effective ventilation ratio are analyzed for the simple house model. The evaluation results for the performance of this unsteady natural cross-ventilation model are reported.

Keywords : Computational Fluid Dynamics, Large-Eddy Simulation(LES), Natural Cross-ventilation, Flow Fluctuation,
Evaluation Method of Cross Ventilation Performance, Particle tracking

数値流体解析 (CFD), Large-Eddy Simulation (LES), 自然通風, 変動気流, 通風性能評価手法, 粒子追跡

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、換気駆動力となる外部風の時間的変動を考慮した実現象により近い実験・解析手法で通風性能を評価することが期待されている。

既往の研究^{1), 2), 3)}では、主に RANS (Raynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) モデルを用いた数値流体解析 (CFD) を行い、時刻的变化が均されたアンサンブル平均値を用いることによって、通風時における建物の時間平均的な室内外風速分布、換気量が明らかにされ、建物の通風性能評価が行われてきた。しかし、実際の環境下では、外部風向・風速に伴って建物周囲の気流場が絶えず変化し、室内風速分布や換気量は絶え間なく変動する。又、時間平均的な解析では通風が得られない開口条件が存在する。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的な圧力差が生じ、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⁾。

通風による室内の風速分布や通風量は、本来、時間的変化が大きく生じる要素であり、通風現象をより実態に即して捉えて通風による建物の換気効果の評価を行うためには、風速の時間的変動を解析できる RANS 以外の解析を行うことが望ましい。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。

筆者らは前報 (その1)¹⁰⁾において、Large-Eddy Simulation (以下 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い、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パターンの住宅モデルを対象に流入気流の時間的変動によって瞬時的に生じる開口間の圧力差に起因する通風性状を把握、分析した。LES 解析結果では、単純住宅モデルの外壁面周辺で剥離流や逆流等の複雑な気流場が再現される。風向に対して対称的な位置に開口を有する住宅モデルを対象とした解析結果では、流入気流の変動に起因する自然換気・通風現象が再現されることを確認した。又、LES 解析結果と PIV 測定結果では、モデル上流側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する。PIV 測定結果と LES 解析結果は

本論文は既発表文献¹⁾⁻⁵⁾で報告したものに加筆・修正し、再構成したものである。

* 新潟大学大学院自然科学研究科 特任助教・博士(工学)
** 新潟大学大学院自然科学研究科 教授・工博
*** 新潟工科大学建築学科 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)
***** 菱機工業㈱新潟支店 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)

Assist. Prof., Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Dr.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., ISRD, University of Niigata Prefecture, Dr.Eng.
Ryoki Kogyo Co., Ltd., Dr.Eng.
Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency, M.Eng.
(Former Grad. Stud., Graduate School of Science and Technology, Niigata University)

定性的に概ね一致しており、本研究の LES 解析では流れ場の基本的構造を再現できていることを確認した。

本報では、風速変動を考慮した自然換気・通風性能評価を行う手法を新たに開発・提案する。更に前報で報告した LES 解析結果を対象として、新たに開発した自然換気・通風性能評価手法により、非定常的な風速変動によって生じる住宅の自然換気・通風現象による換気効果を定量的に評価することを目的とする。

2. 風速変動を考慮した自然換気・通風性能評価手法の概要

2.1 評価対象の単純住宅モデル

Fig. 1 に評価対象の単純住宅モデルの概要、Table 1 に LES 解析の解析 Case を示す。解析対象の住宅モデルは、一辺が 300mm の立方体であり、40mm (高さ) × 40mm (幅) の開口をそれぞれ 2箇所有する。どのモデルにおいても開口高さは地表面から 150mm の位置 (建物高さの中心) に設定する。対向する壁面に一か所ずつ開口を有する場合 (Case1, Case2) は、壁面の中心に開口を設ける。同一壁面に二箇所開口を有する場合 (Case3 ~ 5) の開口間隔は 130mm とする。

2.2 LES 解析条件及び非定常数値流体解析結果

Table 2 に LES 解析の解析条件を、Fig. 2 に解析領域を示す。本研究の数値流体解析に使用するソフトウェアは汎用数値流体解析ソフト STREAM ver. 9 (株)ソフトウェアクレイドル) である。解析領域は風洞を模擬し、7,800mm (長さ) × 1,800mm (高さ) × 1,800mm (幅) である。流入変動気流は、流入プロファイルが $1/4$ 乗則 ($U \propto Z^{1/4}$) とほぼ一致するように、ドライバー領域を用いる

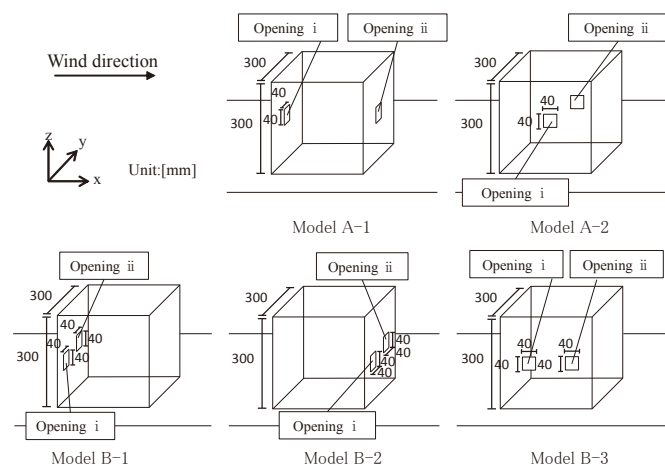


Fig. 1 Schematic view of simple house model

Table 1 Cases analyzed

case	House Model	Positions of openings
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

手法¹¹⁾を採用し作成した。詳細な解析条件は前報を参照されたい。

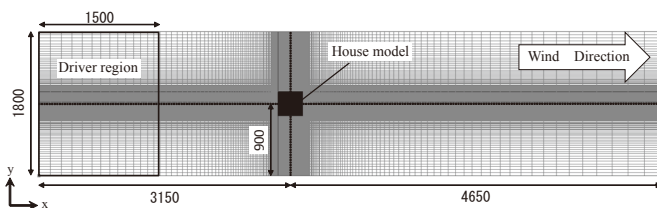
Fig. 3(a) ~ (e) に使用する LES 解析結果 (瞬時室内外流速ベクトル分布)¹⁰⁾を示す。Fig. 3は前報 (その1)¹⁰⁾において LES 解析を行った結果の引用である。LES 解析結果はモデル中心の水平断面であり、図中の風速は基準風速 (5.0m/s、高さ 1.0m) により風速比として示す。図タイトル中の時刻 t は解析開始時刻を $t = 0$ [s] とした解析経過時間を示す。LES 解析結果では、住宅モデル外壁面付近での剥離流、逆流やモデル室内における流入気流の振動が再現されている。また風向に対して対称位置に開口を有する条件では、RANS 解析などの定常数値解析では得られない、外部風の風速変動によって生じる開口間の圧力差に起因する換気現象も再現されている。PIV (Particle Image Velocimetry) による風洞実験測定結果と比較しても、流れ場の基本構造が再現できおり定性的に一致している。本報 (その2) ではこれらの LES 解析結果を用い、新たな自然換気・通風性能評価手法を検討する。

2.3 風速変動による自然換気・通風現象を評価する上で既往の換気性能評価手法を用いた場合の問題点

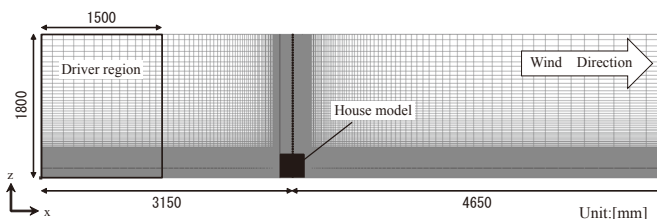
既往の換気性能の評価手法としては、大きく分けて二種類の指標が存在する。一つは任意のある点における濃度応答の時間積分によって室内換気性能を評価する空気齢や空気余命等^{12)、13)}、もう一つは室内の任意の領域で発生させたトレーサ (汚染質) の除去効率により算出される排出換気量を指標とするものである。

Table 2 Computational conditions

SGS model	Dynamic Smagorinsky model		
Analysis region	x=7.8, y=1.8, z=1.8[m]		
Size of house model	x=0.3, y=0.3, z=0.3[m]		
Opening Area	0.04×0.04=0.0016[m ²]		
Boundary condition	Inflow	Instantaneous wind velocity components (u,v,w) are produced by driver region calculation (U∝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]	
Δt	0.00001[sec]		
Minimum grid size	0.005[m]		
Number of grids	210(x)×148(y)×117(z)=3,636,360		



(a) Horizontal section



(b) Vertical section

Fig. 2 Computational domain and grids

空気齢は機械換気設備などにより、流入開口（給気口）と流出開口（排気口）の相対的な位置関係が比較的安定している流れの構造を持つ空間を対象とした換気性能評価指標として多く用いられている。しかし、本報のCase2、Case3、Case4などの様に、時間的に流入・流出開口の位置関係が変化する自然換気・通風時の開口条件では、流れ場の構造が時間的に大きく変化し、各点の濃度応答が時間的に変動し続ける。この様な条件下では評価時間を十分に長く設定した場合でも、空気齢が一定の値に定まらず、ある幅を持った値で変動し続けると推察され、算出された空気齢を換気性能評価指標として解釈することが困難であると考えられる。このため、濃度応答の時間積分に基づく換気性能評価指標では、風速変動による自然換気・通風性能を評価するためには不十分であると考えられる。

一方、汚染質除去効率など濃度分布に基づく換気性能評価方法では、流れ場の構造が時間的に変化する場合でも、換気評価時間を十分に長くすることで非定常的な自然換気・通風現象による排出換気量を算出することが可能である。又、この手法では汚染質発生領域を局所的に設定することで、流入気流のショートサーキットを考慮して換気性能評価を行うことが可能となる場合がある。例えば、本研究のCase3、Case4、Case5において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とにより、流入気流が十分に室内に到達せずショートサーキットする場合を考慮した換気性能評価を行うことが可能である。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、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

ことが困難となる。Fig. 4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、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必要があるためである。前報では、このような開口条件にも適用可能である通風現象の時間的変動を考慮することが可能な新たな自然換気・通風性能評価手法を開発することの必要性を指摘した。

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.

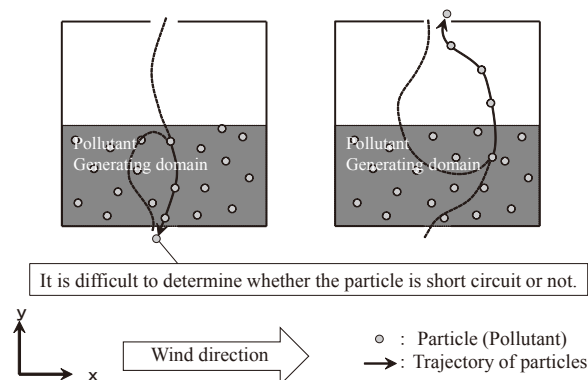


Fig. 4 Problems of pollutant removal efficiency as evaluation method of cross ventilation performance in Case2

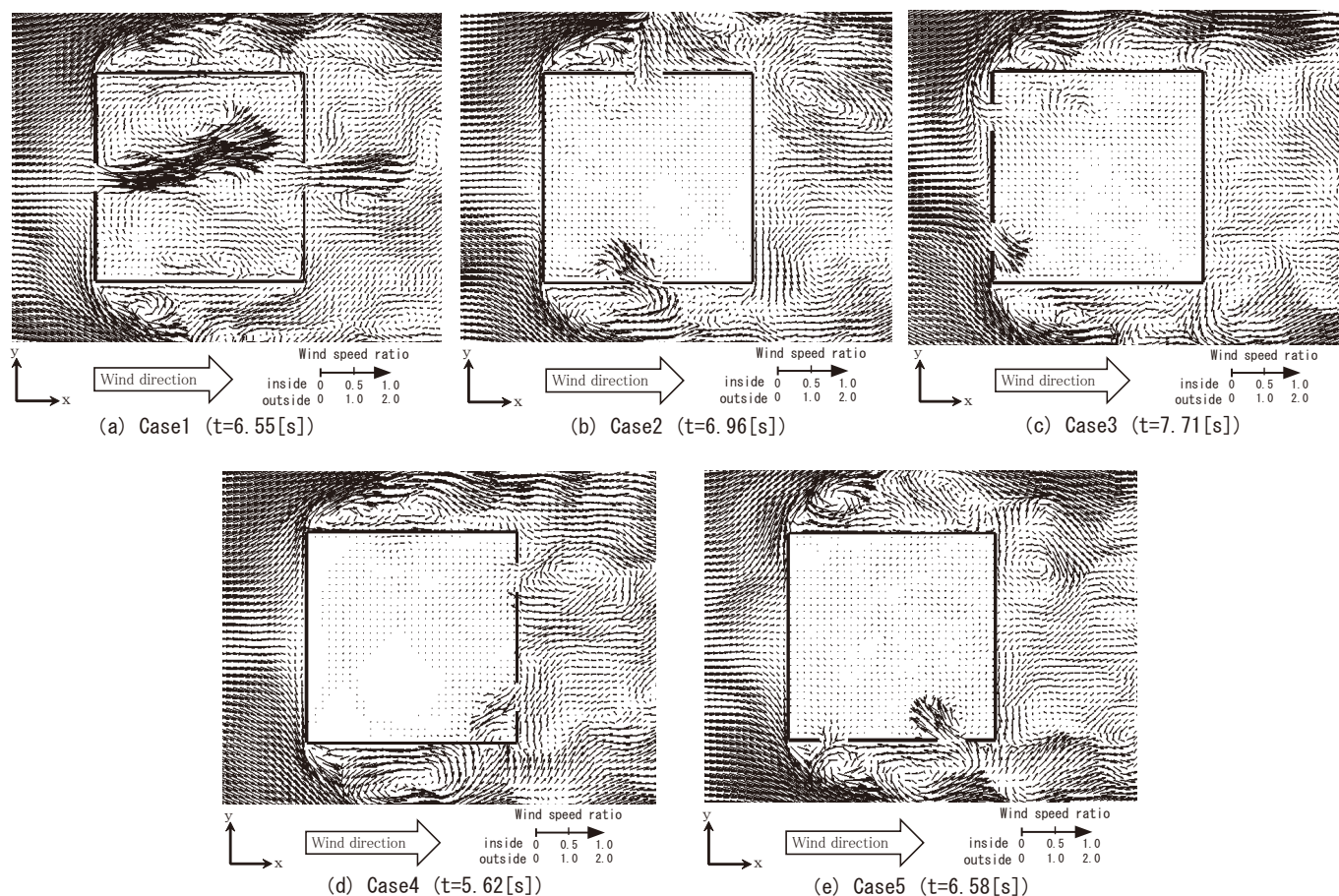


Fig. 3 Distribution of instantaneous velocity vectors in horizontal section at $z=150\text{mm}^{10)}$

2.4 新たに提案する自然換気・通風性能評価手法の概要

Fig. 5 に新たに提案する風速変動を考慮した自然換気・通風性能評価手法を、Fig. 6 に風速変動を考慮した自然換気・通風性能評価手法のダイアグラムを示す。Fig. 6 に示す式 (1)、(2)、(3) は、それぞれ換気性能評価領域到達率 r_i [%]、有効換気量 $Q_{e,i}$ [m^3/h]、有効換気量比 $r_{e,i}$ [-] の定義式である。本研究で提案する新たな自然換気・通風性能評価手法では、まず、新鮮空気 の到達深度を念頭に換気性能評価領域（室内に設定する仮定の領域）を室内の任意の位置に設定する。本報では、ショートサーキット現象を考慮し、流入した新鮮外気の内、居住域の汚染質の排出に有効に寄与する換気量のみを評価するため、開口部に対してモデル中心線から相対する壁面までを換気性能評価領域とする。

次に各開口部において等間隔に 10 行×10 列の粒子の放出点を設け、各時刻において計 100 個の粒子の放出を行う。粒子には質量・大きさは無く、グリッドスケールの瞬時の速度ベクトルに追従する。粒子追跡では放出した粒子の換気性能評価領域到達数が一定となり、粒子追跡結果が定常状態に達するまで気流解析データを周期的^{注1)}に使用する。本報で使用する気流解析データの出力頻度は 500 [Hz]^{注2)}である。本自然換気・通風性能評価手法では、開口面から放出する粒子は新鮮外気を模擬している。粒子追跡の際は、放出された粒子の換気性能評価領域に到達するまでの時間は考慮せず、換気性能評価領域に到達した粒子は全て到達粒子数に加算する。従って、放出直後に換気性能評価領域に到達する粒子と放出後に室内を循環した後、換気性能評価領域に到達した粒子は、同様に新鮮外気が有効

に換気に寄与したとして評価される。これは通風時の換気回数は十数回以上と比較的大きいため、粒子の到達時間差が新鮮外気の汚染度の差として問題ないと判断したためである。尚、PIV 解析結果¹⁴⁾を用いて、各開口面における法線方向の流入出風速ベクトル成分の周波数スペクトル解析を行った結果、2.0 [s] (0.5 [Hz]) にピークが見られたため、本研究における各開口面から粒子を放出する時間間隔は 1.0 [s] とする。

粒子の放出は各開口部から 1.0 [s] 毎に 100 個ずつ、10 秒間で 10 回放出することで、一つの開口部から計 1000 個を放出する。放出した粒子の到達数が一定となり、定常状態に達するまで LES 解析結果の時系列データ（本解析：10.0 [s] 間の解析結果）を周期的に使用する。

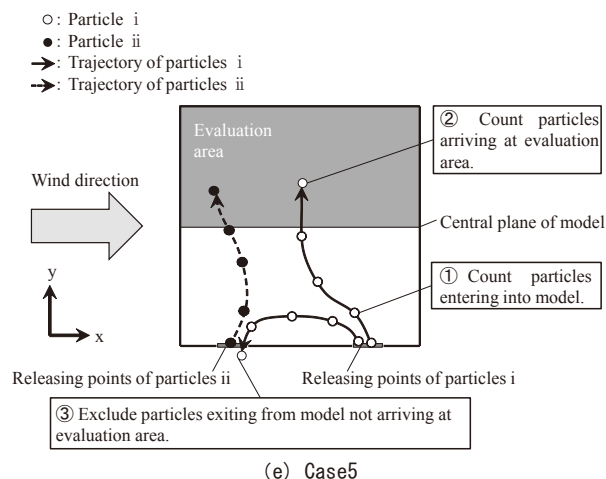
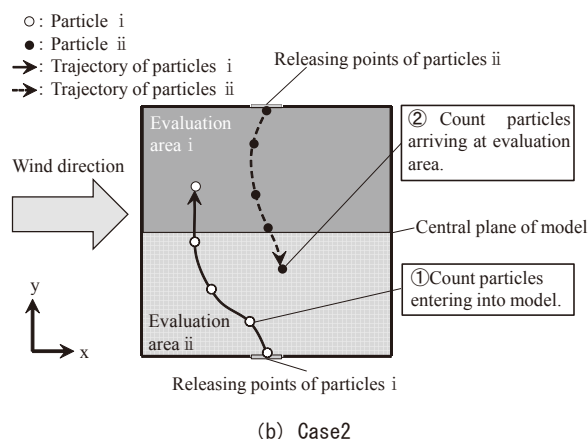
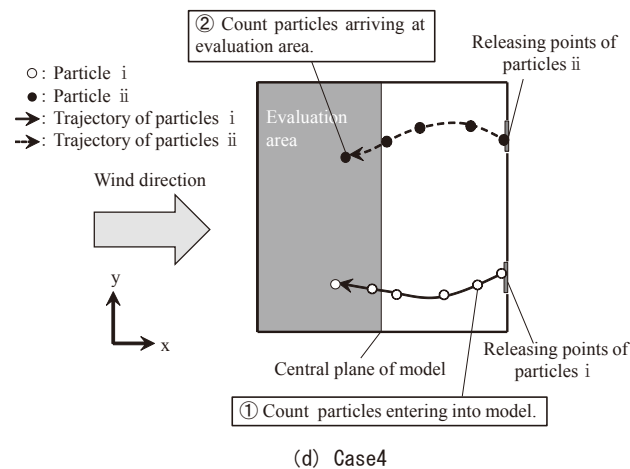
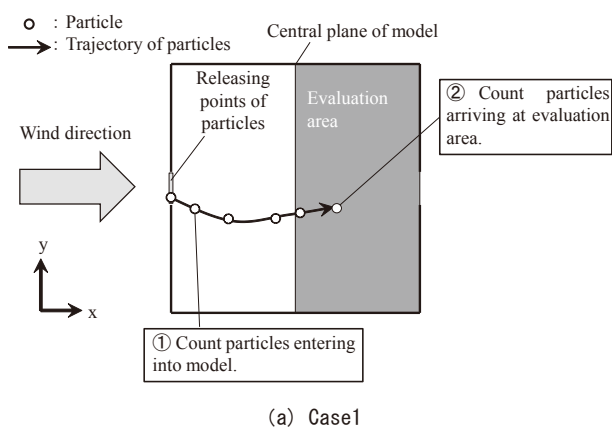
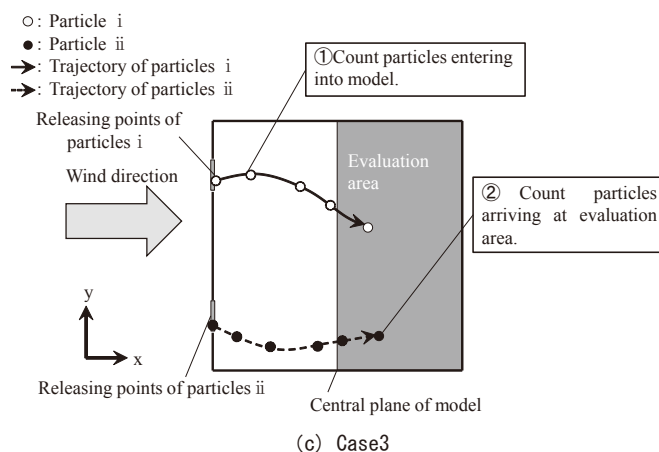


Fig. 5 Evaluation method for natural cross-ventilation performance considering flow fluctuation

以下に各 case における粒子放出方法の詳細を示す。

(1) **Case1**: Case1 では数値流体解析の結果より、風上側開口（開口 i）からのみ気流が流入する。Case1 のように気流の流入・流出開口が明確で時間的に変化しない場合、一つの開口（開口 i）からのみ粒子を放出した場合でも自然換気・通風性能評価結果には大きな影響はないと考えられる。このような場合は計算負荷の観点から粒子を放出する開口を選択して解析を行うことも可能であると考えられる。そのため、本報では Case1 においては、風上側開口（開口 i）からのみ粒子の放出を行う。

(2) **Case2**: Case2 の単純住宅モデル（モデル A-2）は対称的な位置に開口を有しており、時間平均的には換気現象が起きないとされる。本研究で用いる LES 解析結果では、外部の流入変動風に起因し両開口（開口 i，開口 ii）から交互に気流が流出する様子が再現されている。両開口共に気流流入が観察されるため、Case2 では、両開口から粒子の放出を行う。

(3) **Case3**: Case3 の単純住宅モデル（モデル B-1）についても Case2 の場合と同様、対称的な位置に開口を有しており、時間平均的には換気現象が起きないとされる。本研究で用いる LES 解析結果では、外部の流入変動風に起因し両開口（開口 i，開口 ii）から交互に気流が流出する様子が再現されている。両開口共に気流流入が観察

されるため、Case3 では、両開口から粒子の放出を行う。

(4) **Case4**: Case4 の場合（モデル B-2）も対称的な位置に開口を有しており、時間平均的には換気現象が起きないとされる。本研究で用いる LES 解析結果では、外部の流入変動風に起因し両開口（開口 i，開口 ii）から交互に気流が流出する様子が再現されている。両開口共に気流流入が観察されるため、Case4 では、両開口から粒子の放出を行う。

(5) **case5**: Case5 の単純住宅モデル（モデル B-3）では、時間平均的な解析においては風上側開口（開口 i）の方が圧力が低く、定常的に風下側開口（開口 ii）から気流が流入する。しかし、瞬時的な気流性状では開口 i から流入する気流も存在するため、Case5 では、両開口から粒子の放出を行う。

粒子放出後は、室内に流入した粒子数に対する換気性能評価領域に到達した粒子数の割合（換気性能評価領域到達率）を求め、新鮮外気の内、室内居住域の換気に寄与する風量（有効換気量）を算出する。

従来の換気回路網計算などでは、一室で均一な分布として換気性状が計算され、特に通風の場合では、外部風によって生じる換気量が換気回数として比較的多いため、室内での完全混合、完全拡散を仮定しても問題ないと考えられてきた。しかし、本来、通風時の開口条件によっては、通気輪道やショートサーキットが形成され、室内での換気効率に分布（例えば空気齢の分布）が生じることから、流入した新鮮外気の全量が室内の換気に実質的に寄与していないと考えられる。通風時には様々な開口条件や建物周辺状況の影響により、新鮮外気の流入量は比較的小さいが、室内に循環流を形成することで室全体の換気に寄与する場合や、新鮮外気の流入量は多いが、ショートサーキットを形成して直ぐに流出する場合など、様々な室内気流性状が考えられる。本手法を用いることにより、時間的に変化する自然換気・通風性状を対象とした場合でも、室内居住域の換気に実質的に有効に寄与すると考えられる換気量を定量的に評価することが可能となる。以上が本指標でショートサーキットを評価することによる有用性である。

2.5 換気性能評価領域到達率、有効換気量、有効換気量比の算出方法

Fig. 6 に示す式 (1) により換気性能評価領域到達率 r_i [%] を、式 (2) により有効換気量 $Q_{e,i}$ [m^3/h] を、式 (3) により有効換気量比 $r_{e,i}$ [-] を算出する。添え字 i は i 回目の粒子放出を示す。換気性能評価領域到達率 r_i [-] は、粒子が換気性能評価領域に到達する割合であり、 i 回目の粒子放出時において放出された粒子の内、換気性能評価領域に到達した到達粒子数 $n_{r,i}$ [個] を単純住宅モデル内への流入粒子数 $n_{in,i}$ [個] で除して求める。有効換気量 $Q_{e,i}$ [m^3/h] は、 i 回目の粒子放出時の開口面瞬時流入量 $Q_{in,i}$ [m^3/h] に上記で算出した到達率 r_i [-] を乗じたもので、ショートサーキットを考慮して十分に室内に居住域に到達した風量であり、室内の換気に有効であると判定された換気量を示す。有効換気量比 $r_{e,i}$ [-] は、基準モデル（本研究では、流入開口部で放出された粒子の全数がモデル内に流入する Case1 を基準モデルに設定する。）における 10 秒間の時間平均有効換気量 $\bar{Q}_{e,case1}$ に対する各 case の有効換気量 $Q_{e,i}$ [m^3/h] の比である。更に、算出した i 回の有効換気量と有効換気量比をそれぞれ平均し、平均有効換気量及び平均有効換気量比を算出する。

3. 自然換気・通風性能評価結果

3.1 粒子追跡の結果及び有効換気量の算出結果

Fig. 7 に各 Case の粒子数推移を示す。Fig. 7 は開口から放出され

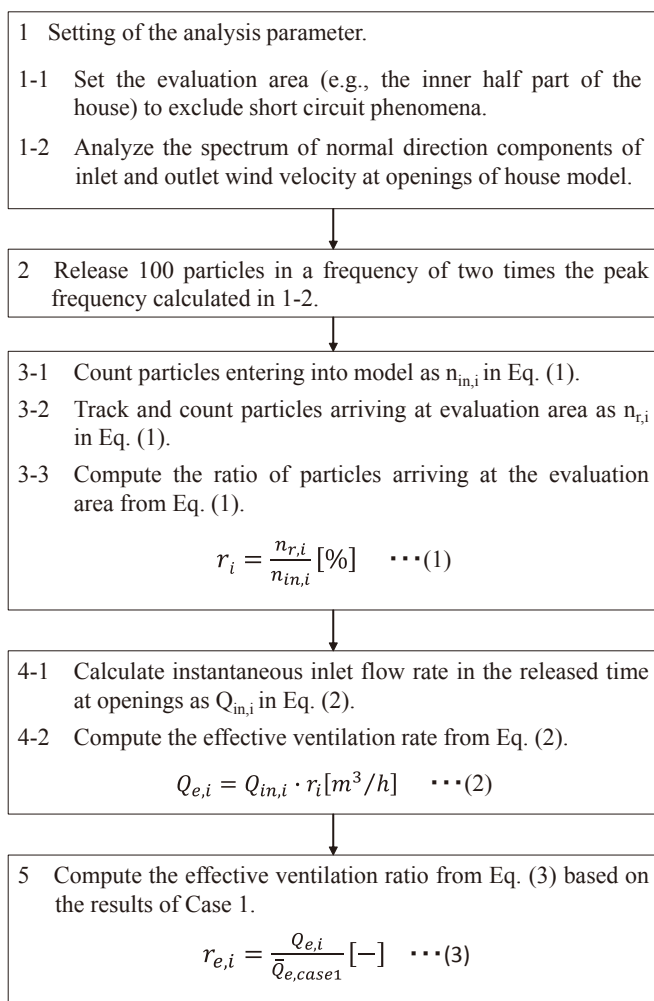


Fig. 6 Diagram of Evaluation method for natural cross-ventilation performance considering flow fluctuation

た粒子数、室内に流入した粒子数及び換気性能評価領域に到達した粒子数の時間推移である。case1 では、ほぼ流入粒子数と換気性能評価領域到達粒子数が同様の値となっているが、その他の case では流入粒子数に対して換気性能評価領域到達粒子数が少なく、室内にショートサーキットが形成されていることが示される。

Fig. 8 に各 Case の粒子放出タイミングにおける流入量を示す。流入量は両開口面における法線方向の流入風速から算出した瞬時の換気量である。

Fig. 9 に各 Case の粒子到達率を示す。粒子到達率は室内に流入した粒子の内、換気性能評価領域に到達した粒子の比率（換気性能評価領域到達率）である。この値を各粒子放出時の開口面流入量に乘じることで室内居住域の換気に実質的に寄与すると考えられる有効換気量を算出する。

Fig. 10 に各 Case の有効換気量を示す。本研究では一定間隔で放出される粒子の各粒子放出時の有効換気量を求め、解析時間 4.6[s] ～ 14.6[s] の合計 10 秒間について、平均化することで平均有効換気量を算出する。

以下に各 case における自然換気・通風性能評価結果を示す。

3.1.1 風上側と風下側に開口を有する場合 (Case1)

開口 i から放出した全粒子が単純住宅モデル室内に流入し、単純住宅モデル内に形成される直線的な流れ場に沿って、開口 ii から排

出される。積算到達粒子は 14.6[s] 以降増加しておらず、定常に達したとみなすことができる (Fig. 7(a))。流入量は $10.1[\text{m}^3/\text{h}]$ から $11.5[\text{m}^3/\text{h}]$ であり、平均流入量は $10.74[\text{m}^3/\text{h}]$ である (Fig. 8)。到達率は最低で 85[%]、平均では 97[%] である (Fig. 9)。Case1 の開口条件では、流入新鮮外気のほぼ全てが室内の換気に寄与すると考えられる。平均有効換気量は $10.43[\text{m}^3/\text{h}]$ であり (Fig. 10)、この値を基準として (3) 式により、各 Case の有効換気量比を求める。

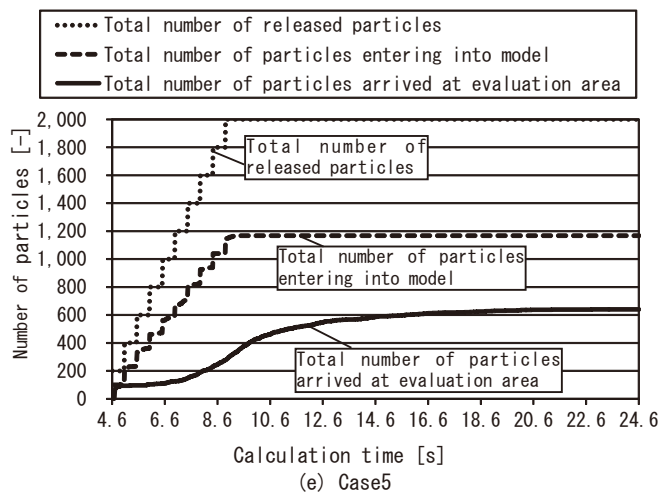
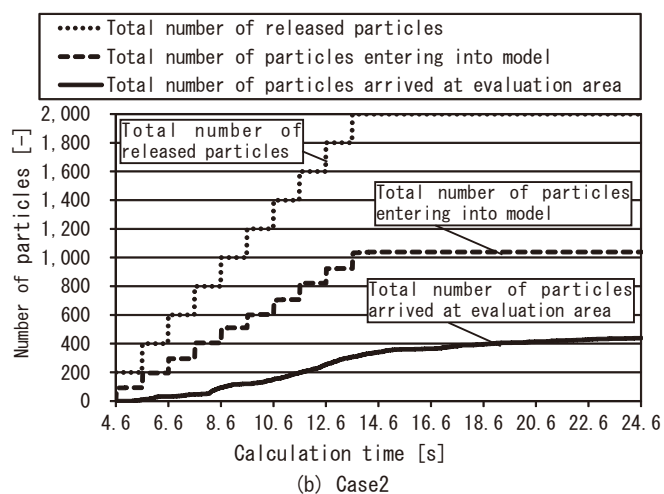
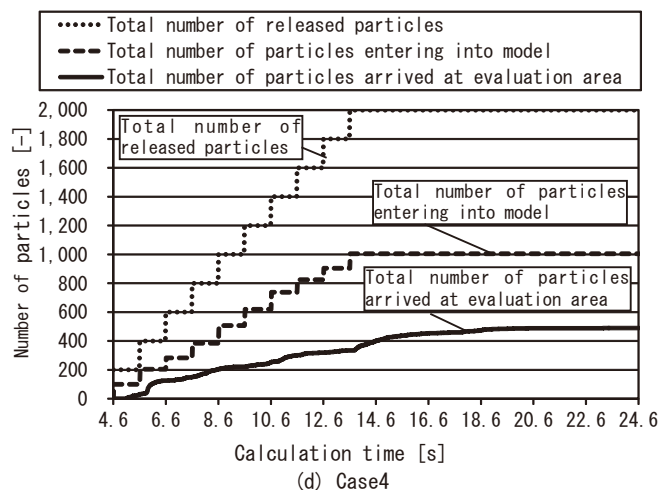
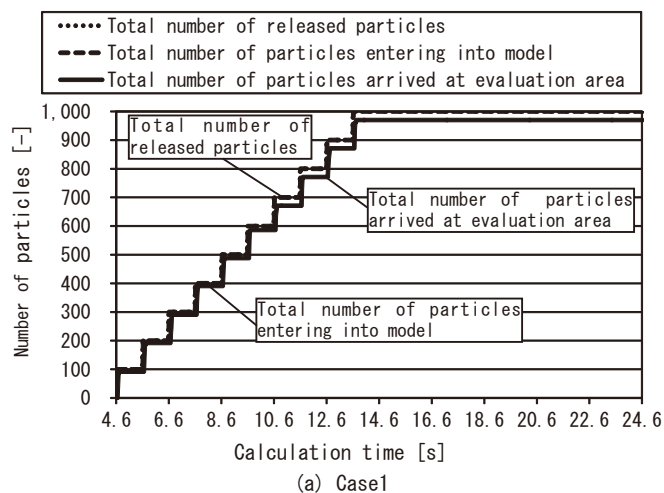
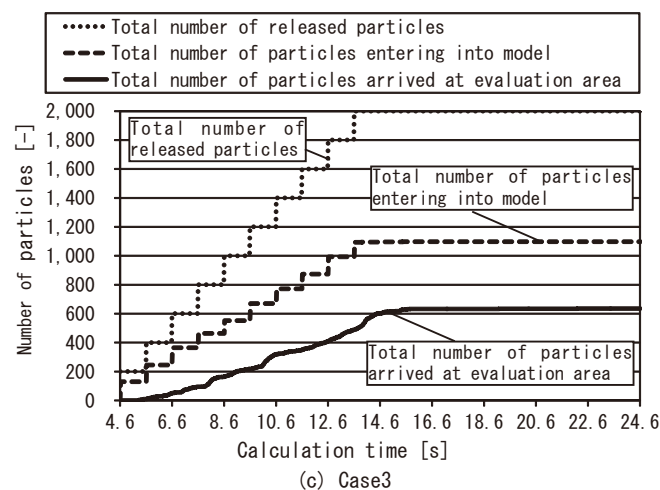


Fig. 7 Time series of the number of particles

3.1.2 風向に対し平行な両壁面に開口を有する場合 (Case2)

積算到達粒子は22.6[s]以降ほぼ増加しておらず、定常に達したとみなすことができる (Fig. 7(b))。流入量は0.7[m³/h] から4.6[m³/h] であり、平均流入量は2.3[m³/h] である (Fig. 8)。平均到達率は42[%] である (Fig. 9)。平均有効換気量は0.98[m³/h] である (Fig. 10)。Case2では、二つの開口がそれぞれ建物外壁面の風上側隅角部で生じる剥離域内に存在している。既往の時間平均的な解析では、風向に対して建物の左右に生じる気流の性状はほぼ一致し、開口面の圧力差が殆ど生じないため、流入出気流は生じない。しかし、本来は外部風の変動によって生じる剥離流の変動に起因して開口間には瞬時的な圧力差が生じ、通風が得られる。本手法ではこの現象による換気量を定量的に評価することが可能である。

3.1.3 風上側壁面に対称に2開口を有する場合 (Case3)

積算到達粒子は20.6[s]以降ほぼ増加しておらず、定常に達したとみなすことができる (Fig. 7(c))。流入量は0.3[m³/h] から4.8[m³/h] であり、平均流入量は2.8[m³/h] である (Fig. 8)。平均到達率は58[%] であり (Fig. 9)、平均有効換気量は1.76[m³/h] となる (Fig. 10)。Case3では、開口が風上側壁面の風向に対して左右対称の位置に設けられている。左右対称の位置に同寸法の開口が存在するCaseでは、時間平均的な解析では開口間に圧力差が生じず、通風は得られない。しかし、実際は外部風の風速変動によって、開口間に圧力差が生じ、これに起因する通風が得られる。本手法ではこの現象に起因する換気量を評価することが可能である。

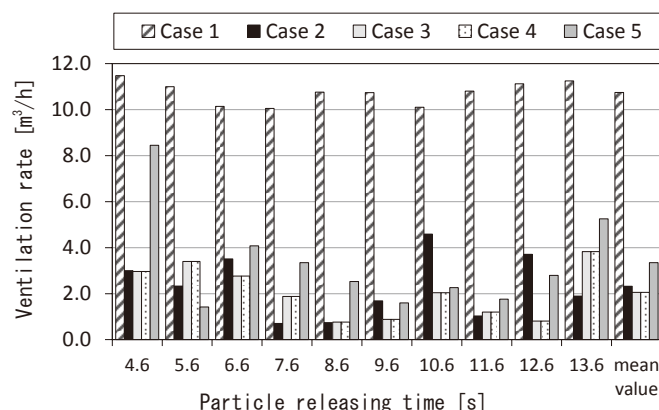


Fig. 8 Ventilation rate

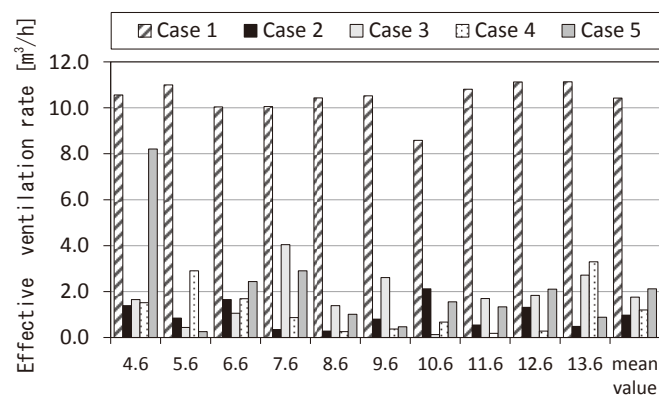


Fig. 10 Effective ventilation rate

3.1.4 風下側壁面に対称に2開口を有する場合 (Case4)

積算到達粒子は20.6[s]以降ほぼ増加しておらず、定常に達したとみなすことができる (Fig. 7(d))。流入量は0.8[m³/h] から3.8[m³/h] であり、平均流入量は2.1[m³/h] である (Fig. 8)。平均到達率は49[%] であり (Fig. 9)、平均有効換気量は1.20[m³/h] となる (Fig. 10)。Case4では建物後流域に面した壁面の風向に対して左右対称の位置に開口が設けられている。後流域では複雑な気流性状が絶えず変化しながら形成される。この気流性状に起因して開口間に圧力差が生じることにより、通風が得られる。本手法によりこの現象に起因する換気量を評価することが可能である。

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

積算到達粒子は20.6[s]以降ほぼ増加しておらず、定常に達したとみなすことができる (Fig. 7(e))。流入量は1.4[m³/h] から8.4[m³/h] であり、平均流入量は3.3[m³/h] である (Fig. 8)。平均到達率は57[%] であり (Fig. 9)、平均有効換気量は2.12[m³/h] となる (Fig. 10)。Case5は、従来から通風が得にくいとされる風向と平行な1つの壁面に2つの開口が設けられている。建物外壁面の風上側隅角部で生じる剥離域内に両開口部が存在し、剥離域内で生じる気流の乱れの性状によって開口間に圧力差が生じること、通風を得られる。本手法ではこの現象に起因する換気量を評価することが可能である。

3.2 各 Case における有効換気量比の比較

Fig. 11 に各 Case の有効換気量比の比較を示す。Case1 の平均有効換気量で各 case の平均有効換気量を基準化し、有効換気量比を算

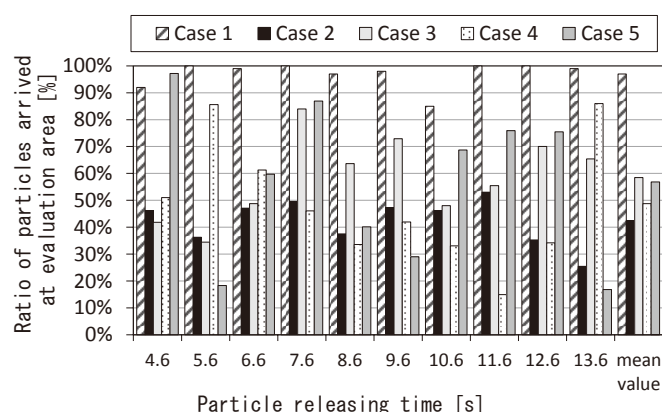


Fig. 9 Ratio of particle arrived at evaluation area

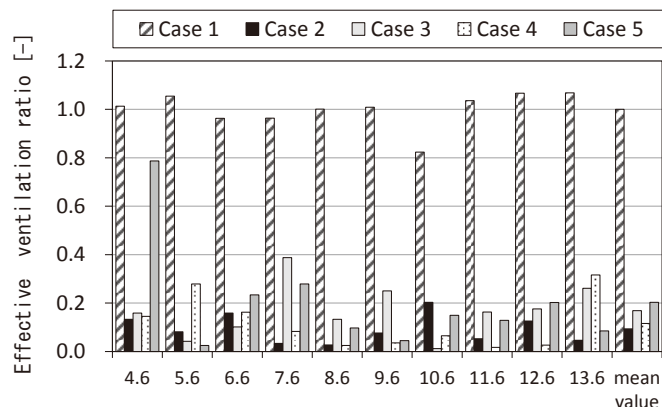


Fig. 11 Effective ventilation ratio

出する。今回解析を行った10秒間の平均有効換気量比は、Case2で0.0937[-]、Case3で0.1685[-]、Case4で0.1154[-]、Case5で0.2030[-]である。時間平均的には通風が得られないとされる開口条件でも、開口を風上・風下に設けた場合と比較して約9[%]～20[%]の換気量を外部風の風速変動により得ることができる。

4. まとめ

本報では、前報で報告したLES解析の解析結果を基に、新たな自然換気・通風性能評価手法を開発・提案した。更に自然換気・通風性能評価の具体例として時間平均的には通風が得にくいとされる開口条件を含んだ5パターンの単純住宅モデルを対象に評価を行った結果を報告した。以下が本報で得られた知見である。

- ① LES解析結果を用いた新たな自然換気・通風性能評価手法を用いることで、RANS解析など定常的な解析だけではすることが困難な外部の風速変動に起因する自然換気・通風性能を定量的に評価することが可能である。
 - ② 本報で提案した新たな自然換気・通風性能評価手法を用いることで、従来の換気性能評価手法では評価が困難な場合もあったショートサーキット現象を考慮し、居住域の換気に有効に寄与する風量を定量的に評価することが可能である。
 - ③ 本報で提案した風速変動を考慮した自然換気・通風性能評価手法を用いた場合、時間平均的には通風が得にくいとされる開口条件でも、外部風の風速変動により生じる開口間の瞬時的な圧力差によって、風上・風下に開口を設けた条件と比較して約9%～20%程度の居住域の換気に有効に寄与する風量を得られることが明らかとなった。
- 尚、本論文に関するLES解析結果上で粒子を放出した結果については、本報末尾に記載するURLから動画として参照できる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 狭間貴雅, 加藤信介, 大岡龍三: LESを用いた単一開口を有する系における空気流出入特性の基礎的検討 単一開口における空気流出入メカニズムの解明 その1, 日本建築学会環境系論文集, No. 617, pp. 17-24, 2007. 7.
- 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.
- 8) 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.
- 9) 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.

- 10) 高野, 赤林, 富永, 坂口, 本田, 有波: 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, 日本建築学会環境系論文集, 第716号, pp. 925-934, 2015. 10.
- 11) 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.
- 12) M. Sandberg: What is Ventilation Efficiency?, Building and Environment, Vol. 16, No. 2, pp. 123-135, 1981.
- 13) 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.
- 14) 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.

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.

本論文に関連する粒子解析動画のURL

http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/dougainfo/journal/les2015_2/les2015_2.html

注

注1) 本研究では既往の気流解析結果(10秒間の気流解析データ)を基に粒子解析を行う。その際、10秒間の気流解析データを周期的に粒子追跡に使用して、換気性能評価領域到達率が一定の値となるまで解析を行った。周期的に気流解析データを使用する場合、解析データの最終サイクルと開始サイクルの間にはデータの断絶が生じているが、本研究では無視して粒子追跡を継続している。

注2) 既往の研究^{※14)}における高速度カメラのフレームレート(500[Hz])を目安として同様の出力頻度に設定している。

記号

- $n_{r,i}$: 換気性能評価領域到達粒子数[個]
- $n_{in,i}$: 室内流入粒子数[個]
- r_i : 換気性能評価領域到達率[%]
- $r_{e,i}$: 有効換気量比[-]
- $Q_{e,i}$: 有効換気量[m³/h]
- $\bar{Q}_{e,case1}$: case1の平均有効換気量[m³/h]
- $Q_{in,i}$: 開口面流入量[m³/h]

添え字

- i: 粒子放出回数番号(i=1,2,3,...,n)

PROPOSAL OF AN EVALUATION METHOD FOR NATURAL CROSS-VENTILATION PERFORMANCE CONSIDERING FLOW FLUCTUATION

Study on naturally cross-ventilated house using large-eddy simulation(LES) part 2

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

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

***** Ryoki Kogyo Co., Ltd., Dr.Eng.

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

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

INTRODUCTION

Natural cross-ventilation is a complex phenomenon, influenced by the distribution of wind velocity, direction, and total pressure on walls. In recent studies using computational fluid dynamics (CFD), steady-state flow fields in a cross-ventilated house model have been studied. Cross-ventilation is not observed using steady-state simulations (e.g., Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation); nevertheless it is an actual phenomenon. In practice, a flow field varies depending on the fluctuation of outdoor wind, and cross-ventilation is affected by the wind turbulence around a house. Therefore, replicating actual phenomena using CFD is very important to evaluate the unsteady cross-ventilation performance of a house. Recently, unsteady fluid phenomena has been analyzed using large-eddy simulation (LES).

In this study, a new evaluation method for natural cross-ventilation that takes flow fluctuation into consideration is proposed. In this method, particles are released at openings and the ratio of particles arriving at the evaluation area within the house model is calculated. Ratio of particles entering into the model, ratio of particles arriving at the evaluation area, effective ventilation rate and effective ventilation ratio are analyzed for the model. Evaluation results concerning unsteady natural cross-ventilation performance are reported.

METHOD

In this study, particles are released based on the results of an LES analysis reported previously. The evaluation area (i.e., the inner half part of the house) is set over the central plane of the model to exclude short circuit phenomena. The ratio of particles arriving at the evaluation area is calculated. 100 particles are released from the opening per second. The time-history of the flow field obtained for 10 s are used repeatedly until a steady state is achieved. Next, only the particles that reached the evaluation area are counted as contributing to the natural cross-ventilation. The ratio of particles arriving at the evaluation area is computed from Equation (1) and the effective ventilation rate is computed from Equation (2) by the amounts of inflow on the opening and the ratio of particles arriving at the evaluation area. Equation (3) shows the effective ventilation ratio based on the results of Case 1 and the other cases.

RESULTS AND DISCUSSION

The results are as follows;

- (1) The ratio of particles arriving at the evaluation area in Cases 1, 2, 3, 4, and 5 are 97%, 42%, 58%, 49%, 57% on an average, respectively.
- (2) The effective ventilation rates in Cases 1, 2, 3, 4, and 5 are 10.43 m³/h, 0.98 m³/h, 1.76 m³/h, 1.20 m³/h, and 2.12 m³/h on average, respectively. The effective ventilation ratio is given by Equation (3) based on the effective ventilation rate of Case 1.
- (3) In Cases 2, 3, 4, and 5 the average effective ventilation ratios are given by 0.0937, 0.1685, 0.1154, and 0.2030, respectively.

CONCLUSION

In this study, a new evaluation method for natural cross-ventilation with consideration of flow fluctuation has been proposed and evaluation results are reported. Consequently, in Cases 2 to 4 wherein no ventilation occurs in a time-averaged flow field, there are unsteady ventilation phenomena. In cases 2 to 4, the effective ventilation rates under unsteady flow are approximately 10% to 20% of those in Case 1.

The particle animation for this study can be found at the URL below:

http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/dougainfo/journal/les2015_2/les2015_2.html

(2015 年 12 月 10 日原稿受理, 2016 年 4 月 7 日採用決定)

