

LES(Large-Eddy Simulation) による住宅の通風性状に関する研究
 - 開口部に風力換気促進装置を設置した住宅を対象とした換気・通風性能評価 -

F 1 5 E 0 4 7 G 中島 昭紀
 指導教員 赤林 伸一 教授

1 研究目的

建物外部を流れる風や室内の温度差による浮力を駆動力とする通風は、夏季や中間期に室内温熱環境の調整手法として従来から広く利用されてきた。通風は自然エネルギーを利用する換気方法であるため、一定の換気量を得られる機械換気に比較して換気量は不安定になる。そのため建築計画の際には、より効果的な通風を得られる開口配置の検討が必要である。野中ら^{x1)}は様々な住宅モデルを対象とした風洞実験により、建物の風上側壁面と風下側屋根面に開口を配置することでより多くの通風量を得られることを明らかにしている。しかし、建築計画上の制約から建物の片側同一壁面の開口を開放する場合が多く、この場合、建物の風上・風下側それぞれの開口を開放した場合に比較して十分な換気量は期待できないとされている。また、必要換気量の算出に用いるザイデル式や流量係数と風圧力差を用いた換気量算出式など、従来の換気量予測は流入した気流の換気経路は考慮されておらず、開口の配置条件によってはショートサーキットを形成し、新鮮空気が居住域に十分到達せずに室外に流出する可能性がある。そのため通風性能の評価を行う際には開口面における換気量のみならず、流入した新鮮空気の内、室内の換気に実質的に寄与する換気量を把握する必要がある。

本研究では、換気・通風性能評価に関する数値解析を行う。実現象では外部風は絶えず変動し、それに伴い室内の気流性状も変化するため、瞬時的な通風現象を評価できる解析手法を用いる必要がある。そこで風速の時間的変化を考慮し、非定常解析が可能なLES(Large-Eddy Simulation)を用いて、風向に対して平行な同一壁面上に2つの開口を有する単純住宅モデルを対象に解析を行う。単純住宅モデルを単体で配置した場合および市街地を想定して2棟隣接して配置した場合の室内外の気流性状の比較を行う。更に建物外部を流れる気流を効果的に室内に誘引するために開口部に風力換気促進装置(GV: ガイドベーン)を設置した場合の換気促進効果を検討する。また、風速変動を考

慮した換気・通風性能評価手法^{x2)}を適用することにより、GVの換気促進効果及び2棟隣接して配置した場合の隣棟間隔が換気性能に与える影響を定量的に評価する事を目的とする。

2 数値流体解析の概要

2.1 解析対象

表1に解析case、図1に単純住宅モデルの概要を、図2に解析領域を示す。解析対象は、一辺300[mm]の立方体の単純住宅モデルとし、風向に対して平行な壁面に、40[mm](高さ)×40[mm](幅)の開口を2箇所設ける。開口の間隔は130[mm]とし、開口の中心は地表面から150[mm]の位置とする。case1(A棟)はGVを設置しない場合、case2(B棟)は風上側開口部の風上側と風下側開口部の風下側に、case3(C棟)は風上側開口部の風下側と風下側開口部の風上側に、GV

表1 解析 case

解析case	GV設置位置		配置条件	隣棟間隔 [mm]	
	風上側開口	風下側開口			
case1 (A棟)	case1-1	なし	単体	-	
	case1-2		2棟	100	
	case1-3		2棟	200	
case2 (B棟)	case2-1	風上側	風下側	単体	-
	case2-2	風上側	風下側	2棟	100
	case2-3			2棟	200
case3 (C棟)	case3-1	風下側	風上側	単体	-
	case3-2			2棟	100
	case3-3			2棟	200

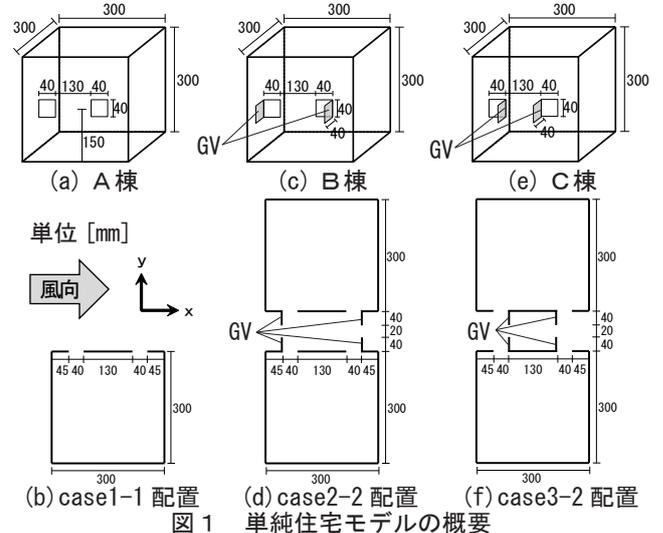


図1 単純住宅モデルの概要

を壁面に対して垂直に取り付ける。GVの寸法は開口部と同様の40[mm](高さ)×40[mm](幅)とする。単純住宅モデルの配置条件は、それぞれのcaseで単体で配置した場合と2棟隣接して配置した場合とする。2棟隣接して配置する場合は、開口を有する壁面を正対させ、隣棟間隔を100[mm]と200[mm]とする。解析領域は風洞を模擬し、1,800[mm](高さ)×1,800[mm](幅)×7,800[mm](長さ)とする。

2.2 LES 解析条件

表2にLES解析条件を示す。LES解析には汎用数値流体解析ソフトSTREAM ver.11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型の境界条件を三層モデルに拡張した条件式³⁾を用いる。LES解析における初期乱流場は、変動成分として各流速成分の振幅を $u=1.0$ [m/s](x成分)、 $v=3.0$ [m/s](y成分)、 $w=3.0$ [m/s](z成分)とする。

2.3 LES 解析のフロー

LES解析ではまず、解析領域の上流部分に変動気流流入境界条件を計算するためのドライバー領域を設け、開口がない単純住宅モデルで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を想定し、 $U \propto Z^{1/4}$ (U:流速、Z:高さ)とする。ドライバー領域による流入変動気流の作成には、片岡ら⁴⁾の方法を用いる。次に、開口を有する単純

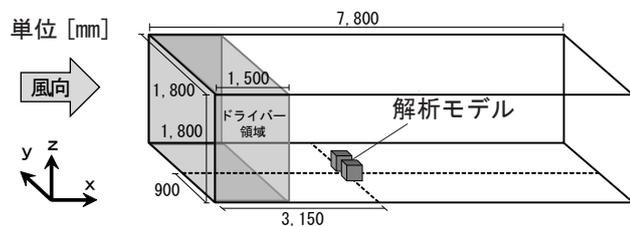


図2 解析領域
表2 LES 解析条件

SGSモデル	Dynamic型 Smagorinskyモデル		
解析領域	7.8(x) × 1.8(y) × 1.8(z) [m]		
単純住宅モデル	0.3(x) × 0.3(y) × 0.3(z) [m]		
開口面積	0.04 × 0.04 = 0.0016 [m ²]		
境界条件	流入	1/4乗則(基準高さ1.0[m]で風速5.0[m/s])	
	流出	自然流出	
	壁境界	Ymin, Ymax, Zmax面	フリースリップ
		Zmin面 流体と接する全ての面 部品面	拡張型 Werner-Wengle
解析時間t	プレ解析	t=0~2.6[s]	
	移行期間	t=2.6~4.6[s]	
	本解析	t=4.6~14.6[s]	
時刻刻みΔt	6.5 × 10 ⁻⁵ [s]		
温度	等温		
最小メッシュ幅	0.005 [m]		
解析領域 メッシュ数	単体で配置	211(x) × 156(y) × 107(z) = 3,522,012	
	隣棟間隔100[mm]	211(x) × 208(y) × 97(z) = 4,257,136	
	隣棟間隔200[mm]	211(x) × 209(y) × 97(z) = 4,277,603	

住宅モデルに対して作成した変動気流を流入させて本解析を行い、室内外気流性状の検討を行う。解析開始からの経過時間をtとし、計算開始後t=0~2.6[s]までをプレ解析とする。t=2.6~4.6[s]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する。t=4.6~14.6[s]までの計10[s]間を本解析の結果として用いる。

3 数値流体解析結果

3.1 LES 解析結果

図3に流入変動気流の平均流速比分布を示す。平均流速比分布は基準流入プロファイルとほぼ同様である。流速比分布^{*1}は、開口の中心(z=150[mm])の水平断面であり、基準高さ1.0[m]における風速5.0[m/s]で基準化した流速比として示す。室内風速比は室外風速比の5倍とする。

3.2 case1(GVを設置しない場合：A棟)

図4~6にcase1の室内外風速比分布を示す。瞬時風速比分布では、単体で配置した場合(図4(a))、風下側開口から断続的に気流が流入するが、建物隅角部で生じる気流の剥離の影響で、風上側開口から流入するタイミングがある。

平均風速比分布では単体で配置した場合(図4(b))は2箇所の開口のうち、風下側開口から風速比0.15程度で流入した気流が開口を有する壁面を沿う様に室内を流れ風上側開口から流出する。2棟隣接して配置した場合(図5(b), 図6(b))は風下側開口から気流が風速比0.4程度で流入し、室内全体を循環するような気流場を形成し風上側開口から流出する。平均換気量^{*2}はcase1-1で3.17[m³/h]、case1-2で5.04[m³/h]、case1-3で6.14[m³/h]となる。

3.3 case2(GVを設置する場合：B棟)

図7~9にcase2の室内外風速比分布を示す。瞬時風速比分布では単体で配置した場合(図7(a))、case1-1と同様に、風下側開口から断続的に気流が流入するが、建物隅角部で生じる気流の剥離の影響で、風上側開口から流入するタイミングがある。

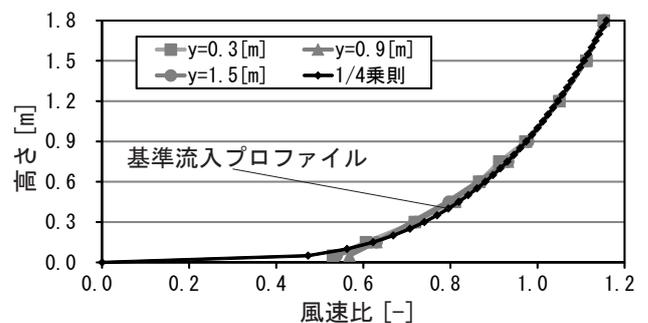


図3 流入変動気流の平均流速比分布
(ドライバー領域下流端部：x=1,500[mm])

平均風速比分布では、単体で配置した場合（図7(b)）は2箇所の開口のうち、風下側開口から気流が風速比0.1程度で開口面に対して垂直方向に室内に流入し、室内全体を循環するような気流場を形成しながら風上側開口から流出する。2棟隣接して配置した場合（図8(b), 図9(b)）は風下側開口から気流が風速比0.4程度で流入し、室内全体を循環するような気流場を形成し風上側開口から流出する。隣棟間隔によらず同様の気流性状となる。平均換気量は case2-1 で $3.29[\text{m}^3/\text{h}]$ 、case2-2 で $5.51[\text{m}^3/\text{h}]$ 、case2-3 で $7.87[\text{m}^3/\text{h}]$ となる。

3.4 case3 (GVを設置する場合：C棟)

図10～12に case3 の室内外風速比分布を示す。瞬時風速比分布では、2棟隣接して配置した場合（図11(a),

図12(a)）風下側開口で気流の流入出が交互に生じる。

平均風速比分布では単体で配置した場合（図10(b)）は2箇所の開口のうち、風下側開口から気流が風速0.2程度で室中央部に向かって流入する。2棟隣接して配置した場合、case3-2（図11(b)）では風上側開口から気流が風速比0.4程度で室中央部に向かって流入し、室内風下側で循環気流を形成する。case3-3（図12(b)）では風上側、風下側の両開口から気流が室内に流入する。風上側開口付近では渦が形成されており気流の流入出が同一開口面で生じている。平均換気量は case3-1 で $4.21[\text{m}^3/\text{h}]$ 、case3-2 で $5.05[\text{m}^3/\text{h}]$ 、case3-3 で $4.89[\text{m}^3/\text{h}]$ となる。

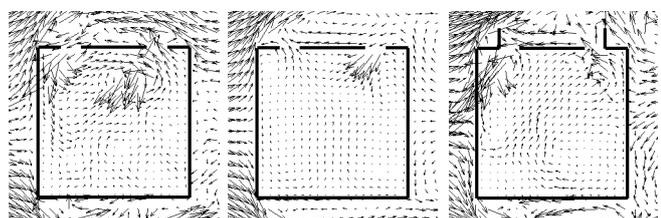


図4 case1-1の室内外風速比分布

図7 case2-1の室内外風速比分布

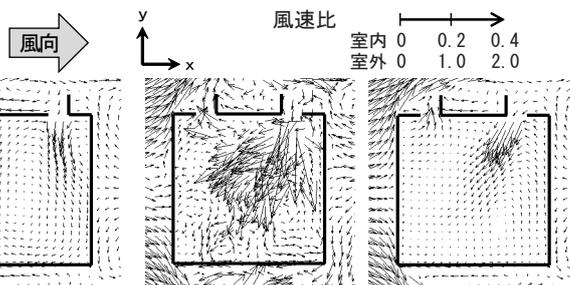


図10 case3-1の室内外風速比分布

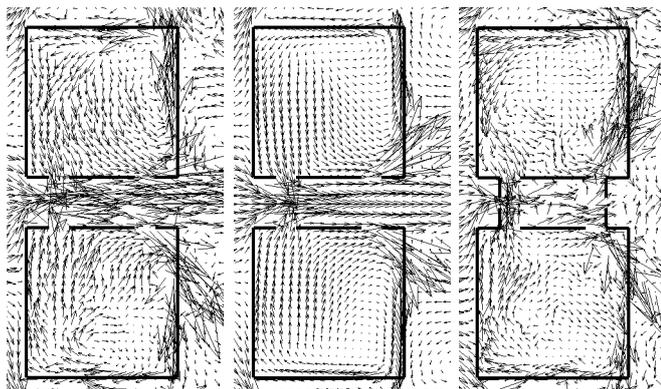


図5 case1-2の室内外風速比分布

図8 case2-2の室内外風速比分布

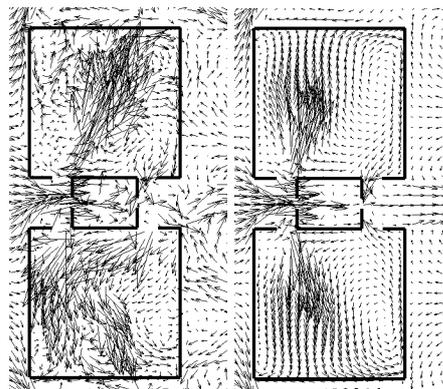


図11 case3-2の室内外風速比分布

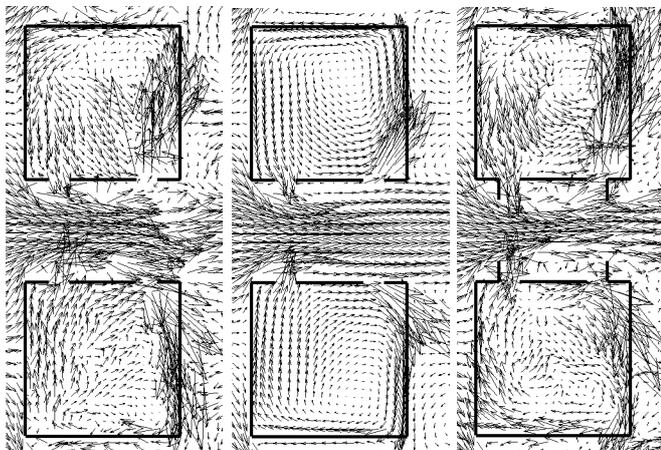


図6 case1-3の室内外風速比分布

図9 case2-3の室内外風速比分布

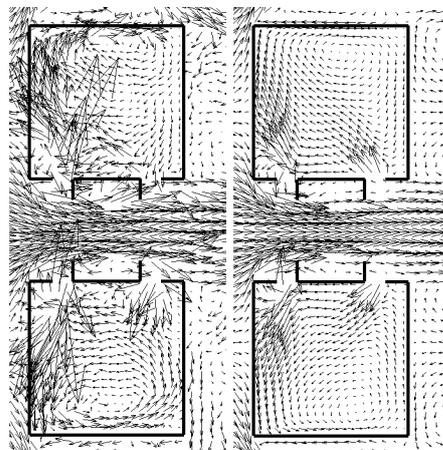


図12 case3-3の室内外風速比分布

4 換気・通風性能評価手法の概要

4.1 評価手法の概要

図13に風速変動を考慮した換気・通風性能評価手法を示す。3.2～3.4で示した平均換気量は開口面における気流の流入出風速により算出しているため、室内に流入した空気の換気経路は考慮されていない。そこで、換気・通風性能評価手法では、新鮮空気の室内到達深度を念頭に、質量、大きさの無い粒子を開口面から放出し、気流に追従させる解析を行う。室内に流入した新鮮空気が居住域に到達せずにショートサーキットする場合を考慮し、モデル中心軸から開口を有する壁面と対向する壁面までを換気性能評価領域とする。開口面から放出した粒子の位置追跡により、室内に流入した空気の内、換気に実質的に寄与する風量を把握することで換気・通風性能評価を行う。

4.2 各解析 case の粒子放出方法

粒子放出間隔は予備解析として実施した開口面の流入方向の流速成分のスペクトル解析により求めたピーク周波数から決定し、粒子を1つの開口部から0.5[s]毎に100個ずつ計10[s]間放出する。粒子放出後は放出した粒子の換気性能評価領域への到達数が一定となり、定常状態に達するまで本解析の10[s]間の結果を周期的に使用する。また、粒子放出を行う開口面はLES解析結果の気流性状により判断し、室内に気流が流入する開口面とする。各 case において住宅モデルを単体で配置する場合は、風上側、風下側の両開口部から気流が流入出するため、風上側、風下側の両開口部から粒子を0.5[s]毎に100個ずつ、10[s]間で計4000個放出する。2棟隣接して配置する場合、A棟とB棟の case では風下側開口部からのみ室内に気流が流入するため、各棟の風下側開口部からのみ粒子を0.5[s]毎に100個ずつ、10[s]間で計4000個放出する。C棟の case では風上側、風下側の両開口部から気流が流入出するため、風上側、風下側の両開口部から粒子を0.5[s]毎に100個ずつ、10[s]間で計8000個放出する。

4.3 有効換気量比の算出方法

表3に有効換気量比の算出方法を示す。まず、開口部から放出した粒子のうち室内に流入した粒子数をカウントし、流入粒子数とする。次に、流入粒子が十分に居住域に到達せずにショートサーキットする場合を考慮し、換気性能評価領域まで到達した粒子数を到達粒子数とする。換気性能評価領域に到達しない粒子、またはモデル内部に流入しない粒子は有効な換気に寄与しないと考え除外する。次に、流入粒子数と到達粒子数から式(1)より到達率(i)を算出し、LES解析結果で算出した各 case の粒子放出タイミング毎の平均換気量(Q)と到達率(i)から式(2)より有効換気量(Q_e)を算出する。また、case1-1の平均換気量をQ₀、有効換気量をQ_{e0}として、各 case の基準化を行い、式(3)より平均換気量比を、式(4)より有効換気量比(r_e)を算出する。

表3 有効換気量比の算出方法

$$i = (n_r/n_{in}) \times 100 [\%] \quad \dots (1)$$

$$Q_e = Q \times i \times 1/100 [\text{m}^3/\text{h}] \quad \dots (2)$$

$$r = Q/Q_0 [-] \quad \dots (3)$$

$$r_e = Q_e/Q_{e0} [-] \quad \dots (4)$$

i : 到達率 [%]

n_r : 到達粒子数 [個]

n_{in} : 流入粒子数 [個]

Q_e : 有効換気量 [m³/h]

Q : 平均換気量 [m³/h]

r : 平均換気量比 [-]

Q₀ : case1-1の平均換気量 [m³/h]

r_e : 有効換気量比 [-]

Q_{e0} : case1-1の有効換気量 [m³/h]

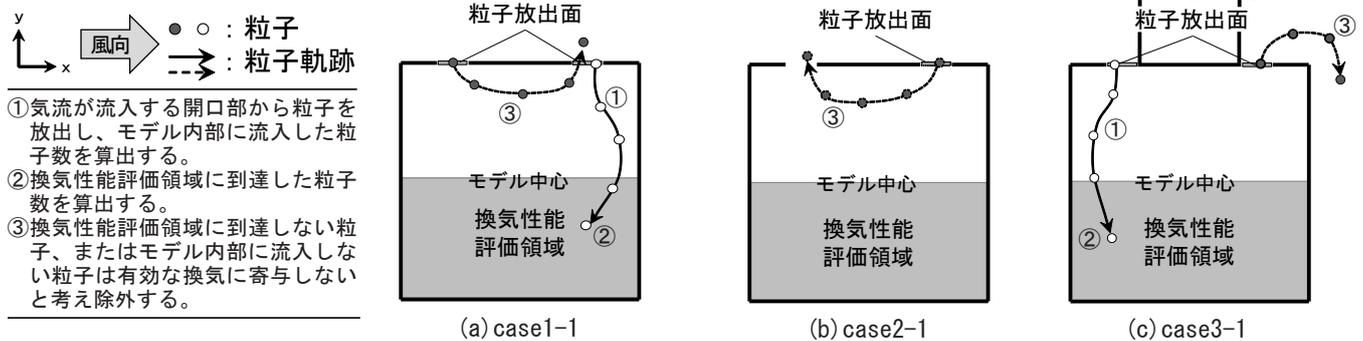


図13 風速変動を考慮した換気・通風性能評価手法

5 換気・通風性能評価結果

図14に粒子放出タイミング毎の平均換気量と到達率の推移を、図15に粒子放出タイミング毎の有効換気量比の推移を、表4に粒子放出結果を、図16に各caseの換気・通風性能評価結果を示す。図16に示す各値は、粒子放出タイミング毎に算出した値を解析時間4.6～14.6[s]の計10[s]間により平均化することで算出する。

5.1 case1 (GVを設置しない場合：A棟)

単体で配置した case1-1 の平均到達率は 53.0 [%] であり、流入風量の約半分がショートサーキットする。2棟隣接して配置した場合、平均到達率は case1-2 で 98.0 [%]、case1-3 で 94.7 [%] と単体で配置した場合に比べて向上する。

単体で配置した場合は建物の隅角部で気流の剥離が生じ複雑な気流場が形成され、風上側・風下側開口で気流の流入出が変動する。そのため、粒子放出のタイミングによって到達率が 19～98 [%] と大きく変動する。

2棟隣接して配置した場合は隣棟間に気流の縮流が生じ、開口付近の風向が安定するため、到達率が定常的に 90 [%] を超える。平均有効換気量比は case1-2 で 2.80、case1-3 で 3.30 となり、2棟隣接して配置した場合、隣棟間隔を広げることで換気性能は向上した。

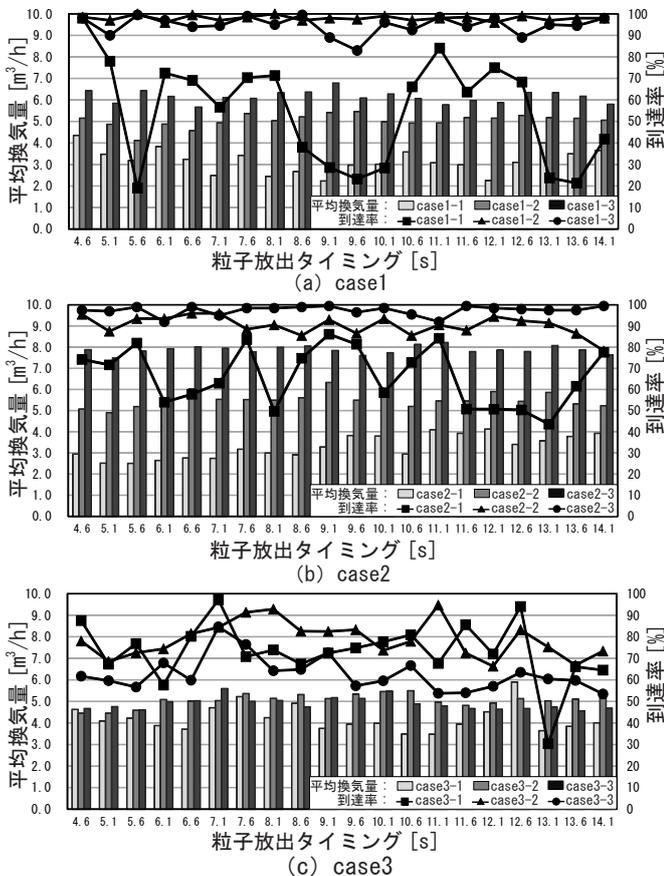


図14 粒子放出タイミング毎の平均換気量と到達率の推移

5.2 case2 (GVを設置する場合：B棟)

単体で配置した case2-1 の平均到達率が 64.9 [%] であるのに対し、case2-2 では 90.3 [%]、case2-3 で 97.4 [%] となり、2棟隣接して配置した場合、到達率は向上する。case1-1 と同様に、単体で配置した場合、建物隅角部の気流の剥離の影響で風上側・風下側開口で気流の流入出が時間的に変動するため、粒子放出タイミングによって到達率は 44%～86 [%] と変動する。

2棟隣接して配置した場合、粒子放出タイミング毎の到達率は定常的に case2-2 で 80 [%]、case2-3 で 90 [%] を超える。平均有効換気量比は case2-1 で 1.24、case2-2 で 2.83、case2-3 で 4.35 となり 2棟隣接して配置した場合、隣棟間隔を広げることで換気性能は向上した。

5.3 case3 (GVを設置する場合：C棟)

単体で配置した case3-1 の平均到達率は 72.8 [%]、2棟隣接して配置した場合、case3-2 は 78.4 [%]、case3-3 は 62.3 [%] となり、配置条件による平均到達率の差は case1、case2 に比較して小さい。各 case で、風上・風下側の開口で流入出開口が時間的に変化するため室内の気流性状が複雑になり、粒子放出タイミング毎の有効換気量比が大きく変動する。平均有効換気量比は case3-1 で 1.77、case3-2 で 2.26、case3-3 で 1.75 となる。

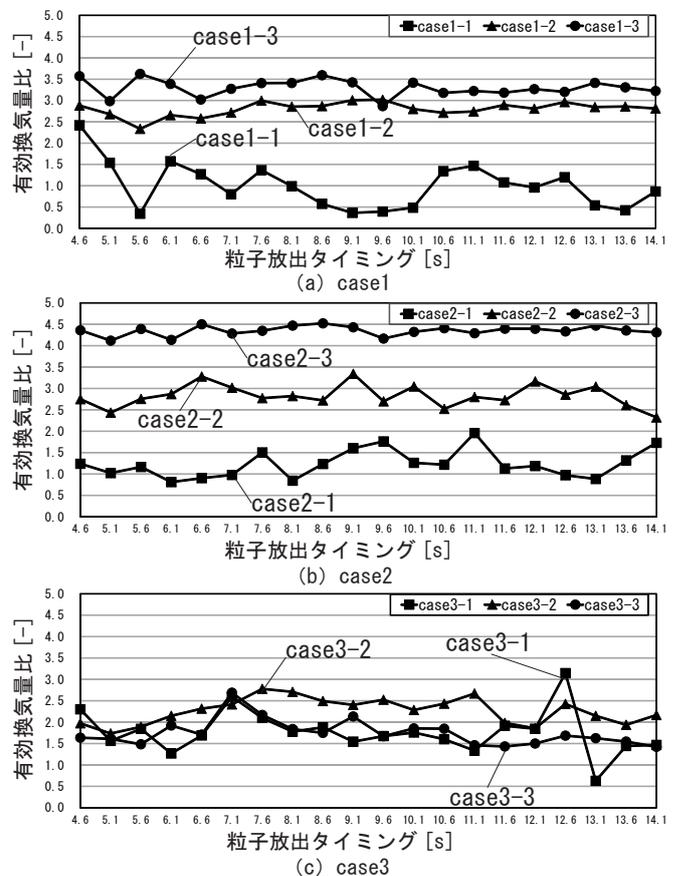


図15 粒子放出タイミング毎の有効換気量比の推移

5.4 各 case の比較

各 case おいて単体で配置した場合は、建物隅角部で生じる気流の剥離の影響で、開口面付近の風向が不安定になり、風上・風下側開口で気流の流入出が時間的に変化する。そのため、平均到達率が case1-1 で 53.0[%]、case2-1 で 64.9[%]、case3-1 で 72.8[%] となり、流入した気流が室内に十分に拡散せずにショートサーキットを形成する。

case1、case2 の住宅モデルでは 2 棟隣接して配置した場合、風上・風下側開口で気流の流入出が時間的に変化せず定常的に室内を大きく循環する気流場が形成されるため、平均到達率が 90[%] を超える。さらに、隣棟間隔を広げることで換気性能が向上した。

単体で配置した場合は case3-1 が、2 棟隣接して配置した場合は case2-3 が最も平均有効換気量比が高くなる。case2-3 は case1-1 に比較して約 4.4 倍の有効換気量を得られる。2 棟隣接して配置した場合、case3 の GV 設置位置では case1、case2 に比較して平均有効換気量比が低く、GV が換気を阻害している。

6 まとめ

- ①住宅モデルを単体で配置した場合、建物外壁の隅角部で気流の剥離が生じるため、開口付近で複雑な気流場となり風上・風下側開口で流入出開口が時間的に変化する。
- ② case1 では、単体で配置した場合 (case1-1)、平均

到達率が 53.0[%] となり、流入風量の約半分がショートサーキットを形成する。また、粒子タイミング毎の到達率が 19 ~ 98[%] と大きく変動する。2 棟隣接して配置した場合、流入した気流は室内に大きな循環気流を形成するため、到達率は定常的に 90[%] を超える。隣接配置することで、換気性能が向上する。

- ③ case2 では、単体で配置した場合 (case2-1)、平均到達率が 65.0[%] となる。2 棟隣接して配置した場合、流入した気流は室内に大きな循環気流を形成するため到達率は定常的に 80[%] を超える。隣接配置することで、換気性能が向上する。
- ④ case3 では、2 棟隣接して配置した場合、風上側開口付近で渦が形成され、同一開口面で気流の流入出が生じる。他の case に比較して、配置条件による有効換気量比の差は小さい。風上・風下側の開口で流入出開口が時間的に変化するため、室内の気流性状が複雑になり、粒子放出タイミング毎の有効換気量比が大きく変動する。
- ⑤単体で配置した場合は case3-1 が、2 棟隣接して配置した場合は case2-3 が最も平均有効換気量比が高い。case2-3 は case1-1 に比較して約 4.4 倍の有効換気量を得られる。
- ⑥ 2 棟隣接して配置した場合、case3 の GV 設置位置では他の case に比較して平均有効換気量比が低く、換気を阻害している。

表 4 粒子放出結果

解析 case	粒子放出数 [個]	流入粒子数 [個]	到達粒子数 [個]	平均到達率 [%]	平均換気量 [m³/h]	平均有効換気量 [m³/h]	平均換気量比 [-]	平均有効換気量比 [-]
case1-1	4000	2328	1233	53.0	3.17	1.76	1.00	1.00
case1-2	4000	3994	3913	98.0	5.04	4.94	1.59	2.80
case1-3	4000	3991	3779	94.7	6.14	5.81	1.94	3.30
case2-1	4000	2479	1610	64.9	3.29	2.18	1.04	1.24
case2-2	4000	3998	3612	90.3	5.51	4.98	1.74	2.83
case2-3	4000	4000	3896	97.4	7.87	7.67	2.48	4.35
case3-1	4000	2257	1643	72.8	4.21	3.12	1.33	1.77
case3-2	8000	4050	3176	78.4	5.05	3.99	1.59	2.26
case3-3	8000	5096	3173	62.3	4.89	3.08	1.54	1.75

注釈

- ※1 瞬時風速比分布における t は解析開始後の経過時間である。
 ※2 平均換気量は各モデルの開口面における瞬時流入量の積算値を、サイクル数で除することにより平均化し算出する。

参考文献

- 文1) 野中・倉淵・大場・遠藤・後藤・塚本「密集住宅地における建物表面風圧分布及び自然通風量に関する風洞実験 密集住宅地における効果的な通風利用を目的とした開口部配置計画手法に関する研究 (第1報)」日本建築学会環境系論文集、2009年
 文2) 有波・赤林・富永・坂口・高野・本田「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」日本建築学会環境系論文集、2016年
 文3) 株式会社ソフトウェアクレイドル「STREAM ver.11 ユーザーズガイド基礎編」2011年7月 pp2-45
 文4) 片岡、水野「流入変動風を用いた三次元角柱回りの気流解析」日本建築学会計画系論文集、1999年

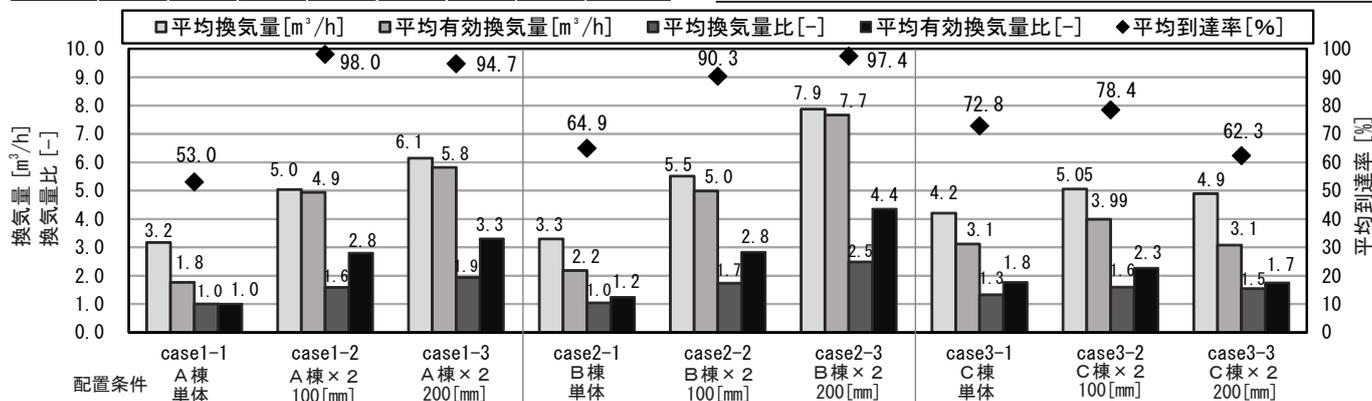


図 16 各 case の換気・通風性能評価結果