数値シミュレーション (LES) による住宅の通風性状に関する研究窓にガイドベーンを設置した場合の換気・通風性能評価

安達 郁弥 指導教員 赤林 伸一 教授

1 研究目的

我が国では古来より、換気による室内温度低下 及び気流感による在室者の体感温度低下効果をも たらす自然通風が広く利用されている。近年では 気候変動の要因の一つと考えられる二酸化炭素の排出 量削減要請により住宅などの民生部門においても空調 負荷の低減等の更なる省エネルギー化が求められてお り、自然通風を利用することで中間期等の冷房負荷軽 減が期待されている。一方、現在の日本の主要都市で は、市街地の密集化が進んでいる。住宅同士の隣棟間 隔が狭くなる傾向があり屋外自然風の利用が困難とな り、気流が室内に十分に流入しない可能性がある。

そこで、市街地における住宅が自然通風を有効的に利用するためのガイドベーン(風力換気促進装置:GV)を窓に設置し、住宅の隣棟間を流れる気流を室内へ取り込むための設置方法を検討する。

自然通風は建築環境工学の分野において多くの研究がなされている。建物の自然換気・通風性能の評価に関しては数値流体解析 (CFD) を用いて定常状態の流体現象を再現する Raynolds Averaged Navier-stokes Simulation (以下:RANS)が多く使用されている。しかし、時間平均的な解析手法である RANS では、絶えず変動する自然風の気流性状を正確に評価できず^{文1)}、流入・流出が同一壁面の開口で生じる場合等の通風性状を把握することが困難である。そこで、流体現象の時間的変動の解析が可能なLarge-Eddy Simulation (以下:LES)を用いた研究が近年行われている。

既往の研究では非定常解析が可能な LES を用いて、 風向に対し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っている。

本研究ではLESを用いて、既往の研究と同様の単純住 宅モデルを対象に隣接建物を無開口の住宅モデルとした

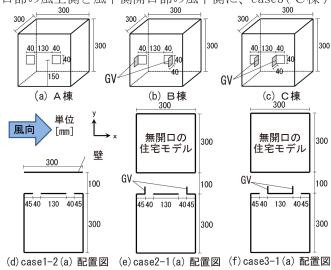
		衣	1 一阵 1/17	case		
A77 -	解析case		GV設置位置		建物周囲条件	隣棟間隔
一月年 名			風上側開口	風下側開口	建物向齿米针	[mm]
	case1-1(a)		なし		無開口の	100
case1	case1-1(b)	A棟			住宅モデル	200
	case1-2(a)				壁	100
	case1-2(b)				至	200
	case2-1(a)	B棟	風上側	風下側	無開口の	100
case2	case2-1(b)				住宅モデル	200
casez	case2-2(a)				壁	100
	case2-2(b)				#	200
	case3-1(a)	C棟	風下側	風上側	無開口の	100
case3	case3-1(b)				住宅モデル	200
cases	case3-2(a)				壁	100
	case3-2(b)				至	200

場合、壁とした場合の解析を行う。また、既往の研究により開発された新鮮空気の室内への到達深度を考慮した新たな換気・通風性能評価手法^{文2)}を適用することにより、既往の研究で検討した単純住宅モデル単体の場合及び2棟隣接して配置した場合と比較することで建物周囲条件の影響、GVによる換気効果及び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。自然通風による気流は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室外に流出する可能性がある。そのため室内外の気流性状や、室内の換気に実質的に寄与する換気量を把握することは極めて重要である。

2 数値流体解析の概要

2.1 解析対象

表1に解析 case を、図1に解析対象モデルの概要を、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(縮尺1/10と想定)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 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じ40[mm](高さ)×40[mm](幅)とする。建物周囲条件は、無開口の住宅モデルを隣接して配置した場合と、300[mm](高さ)×300[mm](幅)の壁を隣接して配置させた場合とする。隣棟間隔は、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^{x3)}を用いる。

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 24 の方法を用いる。次に、開口を有する単純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 $t=0 \sim 2.6[s]$ までをプレ解析とする。 $t=2.6 \sim 4.6[s]$ 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。 $t=4.6 \sim 14.6[s]$ までの計 10[s] 間を本解析の結果として用いる。

3 数值流体解析結果

3.1 LES 解析結果

図 3 に流入変動気流の y・z 平均風速比分布を示す。 平均風速比分布は基準流入プロファイルとほぼ同様である。図 4~15の風速比分布*1は、開口の中心(z=150[mm])

表 2 LES 解析条件

SGSモデル	Dynamic型 Smagorinskyモデル						
解析領域	$7.8(x) \times 1.8(y) \times 1.8(z)$ [m]						
単純住宅モデル	$0.3(x) \times 0.3(y) \times 0.3(z)$ [m]						
開口面積	$0.04 \times 0.04 = 0.0016 [\text{m}^2]$						
	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					
境界条件		Ymi	n, Ymax, Zmax面	フリースリップ			
	壁境界		Zmin面	拡張型			
		流体と	接する全ての面	Werner-Wengle			
	プレ解析 t=0~2.6[s]						
解析時間t	移行期間 t=2.6~4.6[s]						
	本解析	本解析 t=4.6~14.6[s]					
時間刻み△t	時間刻み∆t		$6.5 \times 10^{-5} [s]$				
温度	等温						
最小メッシュ幅	0.005[m]						
解析領域メッシュ数	隣棟間隔100[mm]		$211 (x) \times 208 (y) \times 97 (z) = 4,257,136$				
肝が順域グラフェ数	隣棟間隔200[mm]		$211 (x) \times 209 (y) \times 97 (z) = 4,277,603$				

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] で基準化した風速比として示す。室内の風速比は室外の 5 倍の長さとして表示する。換気回数はモデルの縮尺を 1/10 として実大に換算して示す。

3.2 case1 (GV を設置しない場合: A棟): 図4~7に case1の室内外風速比分布を示す。瞬時風速比分布では、各 case で風下側から気流が風速比0.3~0.4程度で流入し、室内壁面を沿う様に流れ、風上側開口から風速比0.2程度で流出する。

平均風速比分布では、case1-1で風下側開口から気流が x 軸正方向に流入しているのに対して、case1-2では開口面に対し比較的垂直方向に気流が流入する傾向がある。case1では、どの case でも風下側開口から流入した気流は室内全体に大きな循環流を形成しながら、風上側開口から流出する。

換気回数は、実大で換算すると case1-1(a) で 21.4[回]、case1-1(b) で 22.6[回]、case1-2(a) で 20.4[回]、case1-2(b) で 18.1[回]となる。

3.3 case2 (GV を設置する場合: B棟): 図8~11 に case2 の室内外風速比分布を示す。瞬時風速分布では、各解析 case で風下側開口から気流が風速比0.4 程度で流入し、室内壁面を沿う様に流れ、風上側開口から風速比0.2 程度で流出する。

平均風速比分布では、case2では case1 と同様に x 軸正方向に気流が流入するのに対して、壁を配置した場合では開口面に対して比較的垂直に気流が流入する。case2-1、case2-2 ともに室内に大きな循環流を形成しながら風上側開口から流出する。

換気回数は実大で case2-1(a) で 28.3[回]、case2-1(b) で 28.6[回]、case2-2(a) で 21.8[回]、case2-2(b) で 15.8[回]となり、壁を配置させた場合、無開口の住宅モデルの場合より換気回数が大幅に低下する。

3.4 case3 (GV を設置する場合: C 棟): 図 12 ~ 15 に case3 の室内外風速比分布を示す。瞬時風速比分布では、 case3-2(a) で、風上,風下側の両開口付近に渦が形成

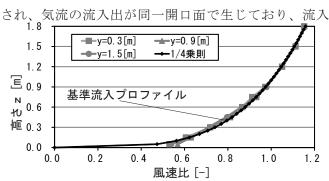
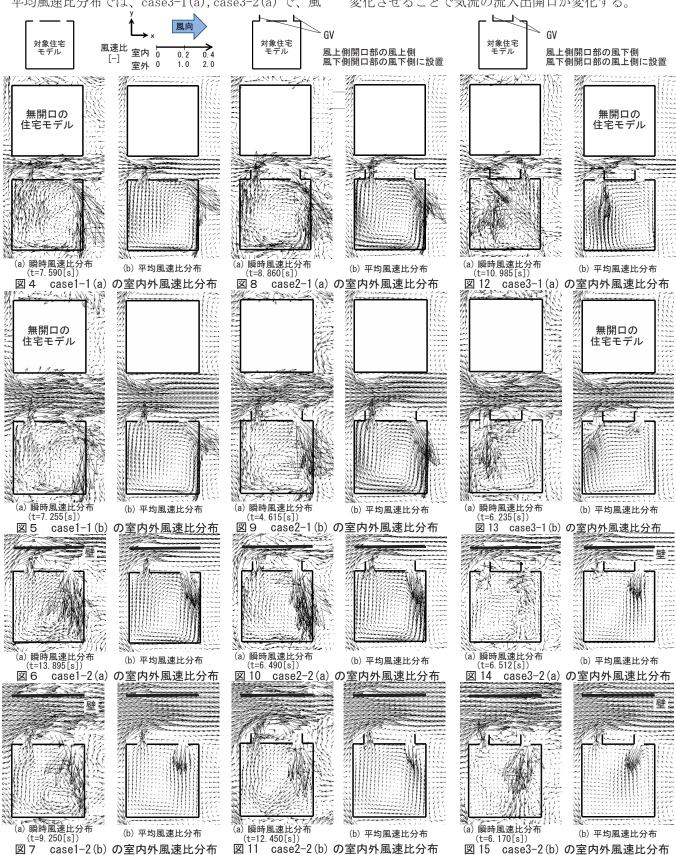


図3 流入変動気流の平均風速比分布 (ドライバー領域下流端部:x=1,500[mm])

出開口位置が時間的に変化するため、室内では複雑な気 流場を形成する。case3-1(a)では、風上側開口から気 流が室内中央に向かって風速比 0.4 程度で流入し、風上 側開口から風速比 0.2 程度で流出する。

平均風速比分布では、case3-1(a), case3-2(a) で、風

上側開口面に渦が形成されており、気流の流入出が同一 開口面で生じる。case3-2(b)では風下側開口から気流 が室中央に向かって流入し、風上側開口から流出する。 case3のGV設置位置では建物周囲条件及び隣棟間隔を 変化させることで気流の流入出開口が変化する。



換気回数は実大でおよそ $17.2 \sim 18.6$ [回]となり、無開口の住宅モデルを配置した場合と壁を配置した場合でほぼ同様の値となる。

4 換気・通風性能評価手法の概要

4.1 評価手法の概要

図 16 に建物周囲条件を考慮した換気・通風性能評価 手法の概要を示す。この換気・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。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。

- (1)単体の場合: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4,000個放出する。
- (2) 2棟を隣接配置する場合(A棟・B棟): 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 風下開口部からのみ粒子を 0.5[s] 毎に 100 個ずつ、 10[s] 間で計 4,000 個放出する。

(3) 2棟を隣接配置する場合(C棟): 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 8,000 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、図 17 に基準 case の概要を示す。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算出し、流入粒子数とする。 流入しない粒子は計算に入れない。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 子は居住域への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 (Qe)を算出する。また、 既往の研究*2)で算出した風上側、風下側壁面に開口 を設けた場合の基準 case の換気量を Qo、有効換気量を Q_{a0} として、各 case の基準化を行い、式(3)より換気 量比(r)を、式(4)より有効換気量比(r。)を算出する。

表3 有効換気量比の算出方法

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

 $Q_e = Q \times i \times 1/100 [m^3/h] \qquad (2)$

 $r = Q/Q_0[-] \qquad \cdot \cdot \cdot (3)$

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

i : 到達率 [%]

n,:到達粒子数[個]

n_{in}: 流入粒子数 [個]

Q_e:有効換気量 [m³/h]

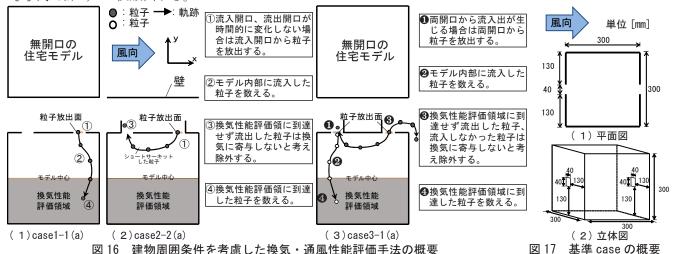
Q : 換気量 [m³/h]

r :換気量比[-]

Q₀:基準 case の換気量 [m³/h]

r。: 有効換気量比 [-]

Q_{e0}: 基準 case の有効換気量 [m³/h]



5 換気·通風性能評価結果

表 4 に粒子放出結果を、図 18 に各 case の粒子到達推 移を、図 19 に各 case の換気・通風性能評価結果を示す。

5.1 case1(GV を設置しない場合: A 棟)

既往の研究において単体で配置した場合の到達率は 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、case1-2(b)を除き、 到達率が90[%]を超える。さらに今回解析したcase においては隣棟間隔が 100[mm] の方が到達率は向上し、 case1-1(a) では99.0[%]、case2-1(a) では99.4[%] となり、99[%]を上回る。

有効換気量比を比較すると2棟を隣接して配置した場 合 0.35 ~ 0.56 となる。単体及び case1-2(b) を除き、 有効換気量比は概ね一定である。case1-2(b) は風上側 開口から流入する気流の風速比が 0.2 程度と他の case に対して小さくなるため換気性能が低下する。

5.2 case2(GV を設置する場合: B棟)

単体で配置した場合の到達率が64.9「%]であるのに

有効換気量比は、有開口の住宅モデルであるB棟を隣 棟間隔 200 [mm] で 2 棟配置した場合と無開口の住宅モ デルを配置した場合で0.7程度となる。壁と無開口の 住宅モデルを隣接して配置した場合で比較すると、壁 を配置した場合で有効換気量比が小さくなり、隣棟間

99.7[%]となる。特に壁を配置した case2-2(a) は到達

隔が200[mm]のcase2-2(b)は最も小さく0.36となる。 case2 では建物周囲条件を変化させることで有効換気量 比に差が生じる。

5.3 case3(GV を設置する場合: C棟)

率が99.7[%]と最も大きい。

case3では、到達率及び有効換気量比ともに単体と 2棟隣接配置した場合で差はほとんどない。到達率で は単体で配置した場合より、無開口の住宅モデル及 び壁を200[mm]で隣接配置した場合のcase3-1(b),3-2(b) で到達率は低下し、50[%] 台となる。一方で、壁 を 100 [mm] で隣接配置した case3-2(a) で到達率が他の case より大きくなり、84.2「%]となる。

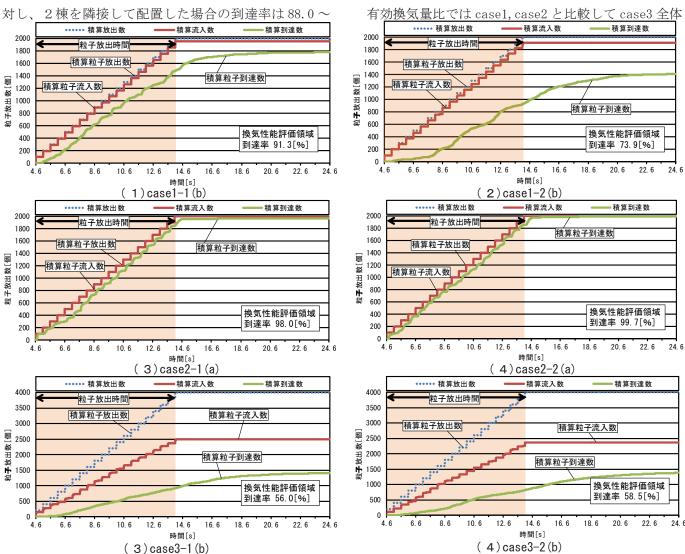


図 18 各 case の粒子到達推移

で値が小さく 0.25 ~ 0.39 となり、建物周囲条件による 大きな変化は見られず、換気性能は低い。

5.4 各 case の比較

各 case に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、到達率が2棟を隣接配置した場合 と比較して小さい。壁を隣棟間隔 200 [mm] で配置した場 合、どの建物モデルでも到達率が他の case と比較して 大きく低下する。また今回の解析 case では隣棟間隔を 変化させる場合に 200[mm] よりも 100[mm] の方が到達率 は大きい傾向がある。

既往の研究の有開口の住宅モデルを隣接配置した場 合では隣棟間隔 200 [mm] の方が有効換気量比はほぼ同 等以上となるのに対し、今回の解析 case では隣棟間隔 100[mm] の場合の方が大きくなる。

3 case の中では case2 の有効換気量比が全体的に大 きい傾向となる。無開口の住宅モデル及び壁を配置した 今回の解析 case の中ではB棟と無開口のモデルを隣棟 間隔 100[mm] で配置した case2-1(a) で 0.72、単体及び 2棟の有開口の住宅モデルを配置した case を含めた全 case の中ではB棟2棟を隣棟間隔200[mm]で配置した

衣 4 和												
	GV 設置 位置	建物周囲条件	隣棟 間隔 [mm]	放出 粒子数 [個]	流入 粒子数 [個]	到達 粒子数 [個]	粒子 到達率 [%]	換気量 [m³/h]	有効 換気量 [m³/h]	換気 量比 [-]	有効 換気量比 [-]	
	基準case		-	1.000	1.000	970	97.0	10.7	10.4	1.00	1.00	
既往の 研究		単体	-	4,000	2, 328	1, 233	53.0	3. 17	1.68	0. 29	0.16	
		有開口の	100	4,000	3, 994	3, 913	98.0	5.04	4.94	0.47	0.47	
		住宅モデル	200	4,000	3, 991	3, 779	94.7	6.14	5.81	0.57	0.56	
case1-1(a)	なし	無開口の	100	2,000	1, 991	1, 971	99.0	5. 77	5. 71	0.54	0. 55	
case1-1(b)		住宅モデル	200	2,000	1, 951	1, 781	91.3	6.09	5. 56	0.57	0. 53	
case1-2(a)		壁	100	2,000	1, 975	1,964	99.4	5. 52	5. 49	0.51	0. 53	
case1-2(b)			200	2,000	1, 911	1, 413	73. 9	4. 90	3. 62	0.46	0. 35	
		単体	ı	4,000	2, 479	1,610	64. 9	3. 29	2. 14	0.31	0. 21	
既往の 研究		有開口の 住宅モデル	100	4,000	3, 998	3, 612	90.3	5. 51	4. 98	0.51	0.48	
- WI 76			200	4,000	4,000	3, 896	97.4	7.87	7. 67	0.73	0. 73	
case2-1(a)	外々	無開口の	100	2,000	1, 998	1, 959	98.0	7. 65	7. 50	0.71	0.72	
case2-1(b)		住宅モデル	200	2,000	2,000	1,874	93. 7	7. 73	7. 24	0.72	0. 69	
case2-2(a)		a)	D#	100	2,000	1, 996	1, 990	99.7	5.89	5.87	0.55	0. 56
case2-2(b)		壁	200	2,000	1, 864	1, 641	88. 0	4. 26	3. 75	0.40	0. 36	
		単体	-	4,000	2, 257	1, 643	72.8	4. 21	3.06	0.39	0. 29	
既往の 研究		有開口の	100	8,000	4, 050	3, 176	78.4	5.05	3.96	0.47	0. 38	
	住宅モデ	住宅モデル	200	8,000	5, 096	3, 713	72. 9	4.89	3.56	0.46	0.34	
case3-1(a)	内々	無開口の	100	4,000	2, 353	1, 631	69.3	4. 64	3. 21	0.43	0. 31	
case3-1(b)		住宅モデル	200	4,000	2, 497	1, 399	56.0	4. 72	2. 65	0.44	0. 25	
case3-2(a)		壁	100	4,000	2, 442	2, 056	84. 2	4. 87	4. 10	0.45	0.39	
case3-2(b)		壁	200	4,000	2, 361	1, 381	58. 5	5. 02	2. 94	0.47	0. 28	

場合の case が最も大きく 0.73 となる。また、case3 の GV 設置位置では case1、case2 に比較して有効換気量比 が低く、GVが換気を阻害している。

6 まとめ

平均風速比分布の結果

- ① case1, case2 ではどの case でも風下側開口から流入 した気流は室内壁面を沿うように流れ、循環流を形成 しながら、風上側開口から流出する。
- ② case3 の GV 設置位置では建物周囲条件及び隣棟間隔 を変化させることで気流の流入出開口が変化する。
- ③ case3 の換気回数は、実大でおよそ 17.2 ~ 18.6[回] となり、壁の場合と無開口の住宅モデルの場合で、ほ ぼ同様の値となる。

換気・通風性能評価の結果

- ① case1 では、単体及び case1-2(b) を除き、有効換気 量比は概ね一定である。
- ② case2 では、壁と無開口の住宅モデルを隣接して配置 した場合で比較すると、壁を配置した場合の方が有効 換気量比が小さくなる。
- ③ case3 では、有効換気量比では case1, case2 と比較し て全体的に値が小さくなり、建物周囲条件による大き な変化は見られず、換気性能は低い。
- ④今回の解析 case の中では case2-1(a) で 0.72、全 case の中ではB棟2棟を隣棟間隔200[mm]で配置した場合 の case が最も大きく 0.73 となる。
- ⑤ case3 の GV 設置位置では case1、case2 に比較して有 効換気量比が低く、GV が換気を阻害している。

注釈

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。 **※**1

参考文献

- 文1) 有波・赤林・富永・坂口・高野・本田「LES による戸建住宅の通風性状に関 -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」 日本建築学会環境系論文集、2014年
- 文2) 有波・赤林・富永・坂口・高野・本田「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・通風性能評価手法の提案」 日本建築学会環境系論文集、2014年
- 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 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

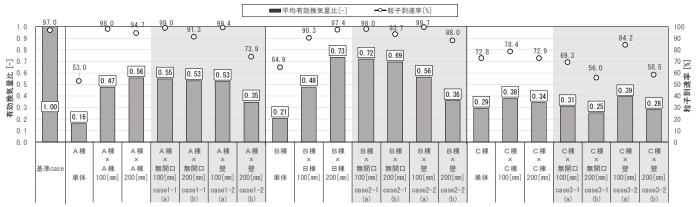


図 19 各 case の換気・通風性能評価結果