

自然風による非定常換気に関する研究

縦シャフトを設置した高層建物モデルを対象とした換気性状

佐藤 将太 指導教員 赤林 伸一 教授

1 研究目的

近年、建物の低炭素化、省エネルギーを目的とし、室内環境の快適性を保ちながら、自然エネルギーを有効利用する手法の1つとして自然換気が用いられている。自然換気は夏季の夜間や中間季に、外部風・室内外の温度差を利用して換気を行うことで、冷房や機械換気に必要なエネルギー消費量の削減が期待でき、オフィスビルや公共施設等に採用されている。

自然換気量の算出には時間平均圧力差が用いられており、外部風の変動により生じる圧力変動は考慮されていないのが現状である。自然換気の場合には、開口で生じる圧力差の時間平均値がほぼ0でも、圧力変動を考慮することで、ある程度の換気量^{文1)}を確保できる可能性がある。既往の研究^{文2)}では、高層の単体及び複数建物モデルを対象とし、中間階の壁面に開口を2ヶ所設けた場合を対象として、風圧変動を考慮した自然換気量の算出・評価を行っている。一方、高層建築では屋上面に生じる負圧を利用した縦シャフトによる換気が利用される事が多く、屋上面の圧力変動を考慮した換気量の検討も必要であると考えられる。

本研究では、単体及び複数建物モデルを対象とし屋外風による風速、風圧の時刻変動をLarge-Eddy Simulation (以下:LES)を用いて解析し、算出された壁面・屋上面の圧力変動データから風圧係数の時刻データおよび平均値を算出する。算出された風圧係数を基に建物内に縦シャフトを設置したモデルを対象に開口間の圧力差を算出し、換気量の計算を行う。平均圧力差及び瞬時圧力差

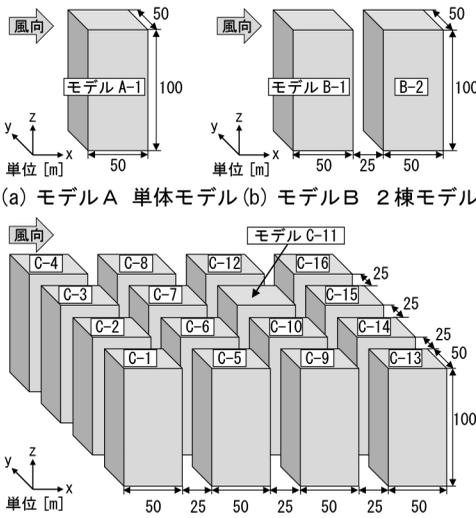


図1 解析対象モデル

表1 LES解析 case

解析case	建物モデル
モデルA 単体	モデルA-1
モデルB 2棟	モデルB-1 モデルB-2
モデルC 4×4棟	モデルC-1
	モデルC-2
	モデルC-3
	モデルC-4
	モデルC-5
	モデルC-6
	モデルC-7
	モデルC-8
	モデルC-9
	モデルC-10
	モデルC-11
	モデルC-12
	モデルC-13
	モデルC-14
	モデルC-15
	モデルC-16

による換気量を比較・検討することで、風圧変動による自然換気量を定量的に評価することを目的とする。

2 数値流体解析の概要

2.1 解析対象建物：図1に解析対象モデルを、表1にLES解析 caseを示す。建物モデルは、50[m](x) × 50[m](y) × 100[m](z)とする。解析 case は、単体モデルをモデルA、2棟モデルをモデルB、4×4棟モデル(計16棟)をモデルCとする。モデルAは建物モデルを1棟(モデルA-1)配置する。モデルBは風上側(モデルB-1)と風下側(モデルB-2)に建物モデルを風向に対して直列に配置し、風上側建物モデルと風下側建物モデルの隣棟間隔は25[m]である。モデルCは建物モデルを4×4棟に整列配置(モデルC-1~モデルC-16)し、市街地を模擬したモデルとし、各建物モデルの隣棟間隔はxy方向ともに25[m]である。

2.2 解析条件：図2に解析対象領域を、表2にLES解析条件を示す。LES解析における各長さ、時間は実スケールで示す。本研究では汎用数値流体解析ソフトウェア STREAM ver.13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、等温で解析を行う。壁面境界条件には壁面対数則を用いる。流入変動気流はドライバー領域^{文3)}により作成する。解析開始からの経過時間をtとし、解析開始後t=2,000[s]までを流入変動気流作成のためのプレ解析

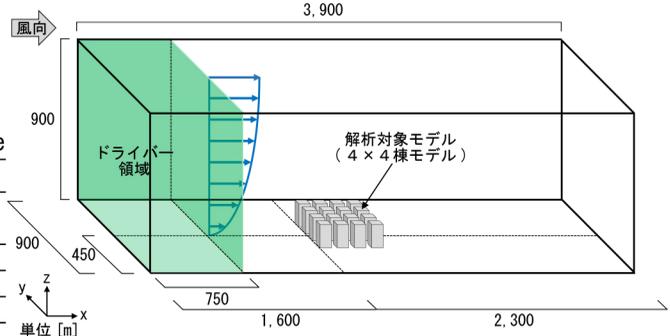


図2 解析対象領域

表2 LES解析条件

SGSモデル		Dynamic型 Smagorinskyモデル	
解析対象領域	3,900(x) × 900(y) × 900(z) [m]		
解析対象領域	建物モデル	50(x) × 50(y) × 100(z) [m]	
境界条件	流入	ドライバー領域で流入変動気流を作成する	
	流出	自然流出	
	壁境界	Ymin, Ymax, Zmax面	フリースリップ
		Zmin面	拡張型
		流体と接する全ての面	Werner-Wengel
解析時間 t	プレ解析 : t=0~2,000[s], 本解析 : t=2,000~5,000[s]		
瞬時データサンプリング間隔	1.0[s]		
温度	等温		
最小メッシュ幅	0.2[m]		
解析領域メッシュ数	単体モデル	260(x) × 197(y) × 103(z)	=5,275,660
	2棟モデル	355(x) × 197(y) × 103(z)	=7,203,305
	4×4棟モデル	482(x) × 220(y) × 103(z)	=10,922,120

とし、 $t=2,000 \sim 5,000$ [s] までの計 3,000 [s] 間を本解析の結果として用いる。基準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。

2.3 基準動圧及び風圧係数の算出方法：風圧係数の算出に用いる基準動圧は、建物の影響がなく、解析 case によって鉛直方向の風速の変化がない上空 ($x=750$ [m]、 $y=450$ [m]、 $z=800$ [m]) の平均風速 (5.6 [m/s]) を 1/4 乗則を基に軒高 ($z=100$ [m]) に換算した風速を基準風速として、(1) 式を用いて算出する。風圧係数は (2) 式を用いて、LES により算出した壁面圧力を基準動圧で除すことで算出する。

$$p_{v0} = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \text{ [Pa]} \dots (1) \quad C_p = \frac{P_w}{P_{v0}} \text{ [-]} \dots (2)$$

p_{v0} : 基準動圧 [Pa]	ρ : 空気密度 [kg/m ³]	v_0 : 基準風速 [m/s]
C_p : 風圧係数 [-]	P_w : 壁面圧力 [Pa]	

2.4 開口部の位置と面積：図 3 に縦シャフトの屋上開口部を、図 4 に建物モデルの開口部位置と面積を示す。建物モデル内に 4.0 [m] (幅) × 4.0 [m] (奥行) × 80 [m] (高さ) の縦シャフトを 3ヶ所設置し、それぞれを風上から縦シャフト①～③とする。縦シャフトの屋上開口部は、4.0 [m] (幅) × 4.0 [m] (奥行) とし、流量係数 α は 0.6 [-] とする。壁面開口部及び縦シャフトの各階における開口部は、6階 (地上 20 [m]) の風上、風下及び風向と平行な壁面中心 (地上 22 [m]) から 4 [m] 毎に 25 階まで設置する。各壁面開口部の大きさは 1.0 [m] (幅) × 0.5 [m]

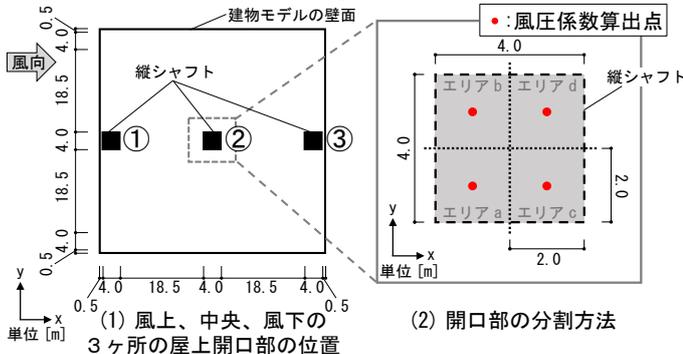


図 3 縦シャフトの屋上開口部

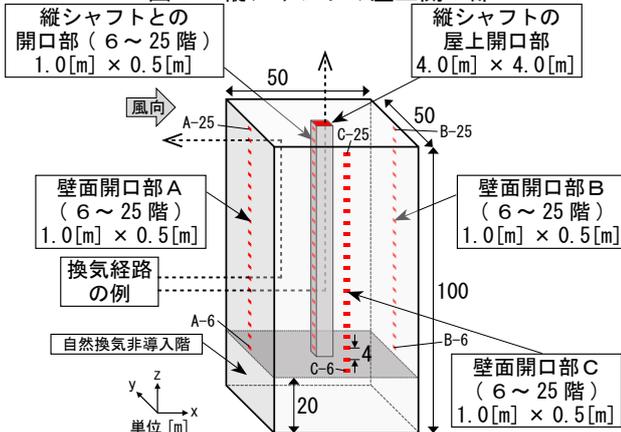


図 4 建物モデルの開口部位置と面積

(高さ) とし、流量係数 α は 0.6 [-] とする。

2.5 換気量の算出方法：表 3 に換気量の計算条件を示す。case1 は風上側壁面の開口部 A を開放した場合、case2 は風下側壁面の開口部 B を開放した場合、case3 は風向と平行な壁面の開口部 C を開放した場合とする。縦シャフト①～③をそれぞれの計算条件で 1ヶ所のみ開放し、表 1 に示す各建物モデルに対して計 9 条件の換気計算を行う。壁面開口部では中心点、屋上開口部では 4 分割^{*2} (エリア a～d) したそれぞれの中心点の風圧係数を用いて換気計算を行う。平均風圧係数差による換気量及び瞬時風圧係数差による換気量を換気回路網計算ソフト COMIS を用いて算出し、両者の換気量を比較することで風圧変動による換気量を評価する。

3 LES 解析結果

3.1 屋上開口部の風圧係数：図 5 にモデル A-1 (単体)、B-2 (2 棟) の屋上面時系列風圧係数 (エリア a 中心) を、図 6 にモデル A-1 (単体)、B-2 (2 棟)、C-11 (4 × 4 棟) の屋上面平均風圧係数分布を示す。

(1) **モデル A-1 (単体)** (図 5 (1)、図 6 (1))：モデル A-1 の屋上開口における平均風圧係数は縦シャフト①で -1.90、縦シャフト②で -0.97、縦シャフト③で -0.56 となる。最も風上側に存在する縦シャフト①の風圧係数は瞬時的に -4.00 程度の負圧が生じることがあり、縦シャフト②、③の風圧係数に比較して変動が大きい。屋上面の風上側では剥離域が存在するため大きな負圧となり、変動も大きい。モデル A-1 における屋上面の風圧係数分布 (図 6 (1)) は、風上側から風下側に向かって負圧が小さくなる。

(2) **モデル B-2 (2 棟)** (図 5 (2)、図 6 (2))：風下側モデル B-2 の屋上開口における平均風圧係数は縦シャフト①で -0.01、縦シャフト②で -0.11、縦シャフト③で -0.21 となる。モデル A-1 と同様に風上側の縦シャフト①の風圧係数は風下側の縦シャフトに比較して変動が大きい傾向がある。風下側モデル B-2 では、モデル A-1 に比較して屋上面の平均風圧係数の分布が小さ

表 3 換気量の計算条件

case	開放する壁面開口部	開放する縦シャフト	開口部の面積
case1	case1-1	風上側壁面の開口部を開放した場合 (壁面開口部 A)	・ 壁面開口部及び縦シャフトとの開口部 1.0 [m] × 0.5 [m]
	case1-2		
	case1-3		
case2	case2-1	風下側壁面の開口部を開放した場合 (壁面開口部 B)	・ 縦シャフトの屋上開口部 4.0 [m] × 4.0 [m]
	case2-2		
	case2-3		
case3	case3-1	風向と平行な壁面の開口部を開放した場合 (壁面開口部 C)	
	case3-2		
	case3-3		

い(図6(2))。風上側の縦シャフト①に比較して、風下側の縦シャフト③の風圧係数は負圧が大きくなる。

(3) モデルC-11(4×4棟)(図6(3))：風上から2列目以降(モデルC-5～C-16)の屋上面風圧係数分布はほぼ同様である。モデルC-11の屋上開口における平均風圧係数は縦シャフト①で-0.36、縦シャフト②で-0.34、縦シャフト③で-0.35となる。モデルA-1、B-2に比較して屋上面の平均風圧係数分布が極めて小さく、風上側の縦シャフト①と風下側の縦シャフト③で平均風圧係数の差は0.01程度である。

4 換気量の算出結果

4.1 時系列換気量の算出結果：図7～図10にモデルA-1(単体)、B-2(2棟)、C-11(4×4棟)の壁面開口部(6、15、25階と6～25階の合計)及び屋上開口部の流入出力時系列データ^{**3}を示す。尚、換気量は軒高(z=100[m])の風速(3.3[m/s])で除すことにより外部風速1.0[m/s]時の換気量で示す。建物に対して流入する量を正(+)、流出する量を負(-)とする。

(1) モデルA-1(単体)(図7、図8)

(a) case1-2(図7(1)、図8(1))：風上側壁面の開口部Aと縦シャフト②の開口部を開放した場合、壁面の圧

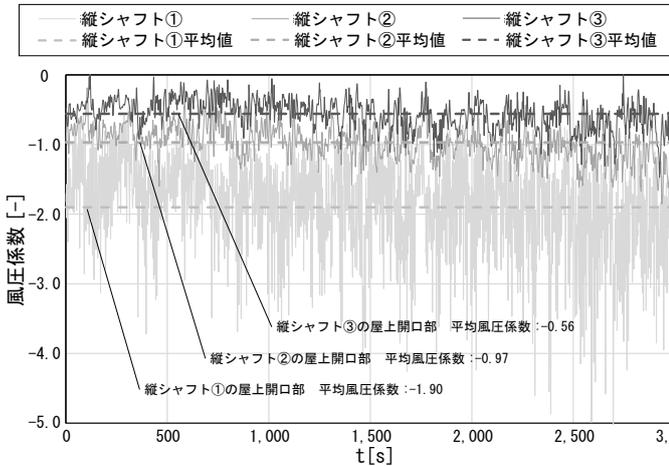
力に対して屋上面の負圧が大きいため、瞬時換気量はどの時刻であっても殆どの階で壁面の開口部Aから流入する。ただし、25階の壁面開口部では流出する時刻もある。(図8(1))

(b) case3-2(図7(2)、図8(2))：風向と平行な壁面の開口部Cと縦シャフト②の開口部を開放した場合、瞬時換気量は壁面の開口部Cから流入する時刻と屋上面の開口部から流入する時刻が同程度であり、流入側となる開口部の位置が頻繁に変化する。壁面開口部Cの位置では屋上面の開口部と同様に剥離域が存在し、負圧が大きいため、瞬時的な圧力差が生じることで6、15、25階で流入側となる開口部の位置が頻繁に変化する。(図8(2))

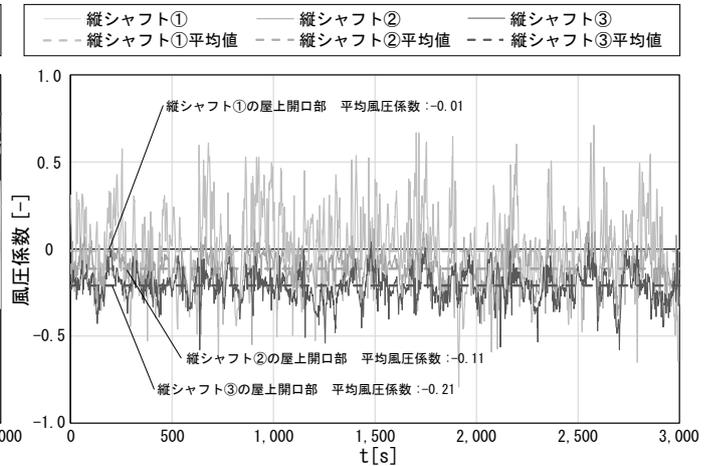
(2) モデルB-2(2棟)(図9)

(a) case1-2(図9(1))：風上側壁面の開口部Aと縦シャフト②の開口部を開放した場合、瞬時換気量はほとんどの時刻で屋上面の開口部から流入するが、壁面の開口部Aから流入する時刻もある。

(b) case3-2(図9(2))：風向と平行な壁面の開口部Cと縦シャフト②の開口部を開放した場合、瞬時換気量はcase1-2と異なり、屋上面の開口部から流入する時刻が



(1) モデルA-1(単体)



(2) モデルB-2(2棟の風下側)

図5 モデルA-1(単体)、B-2(2棟)の屋上面時系列風圧係数(エリアa中心)

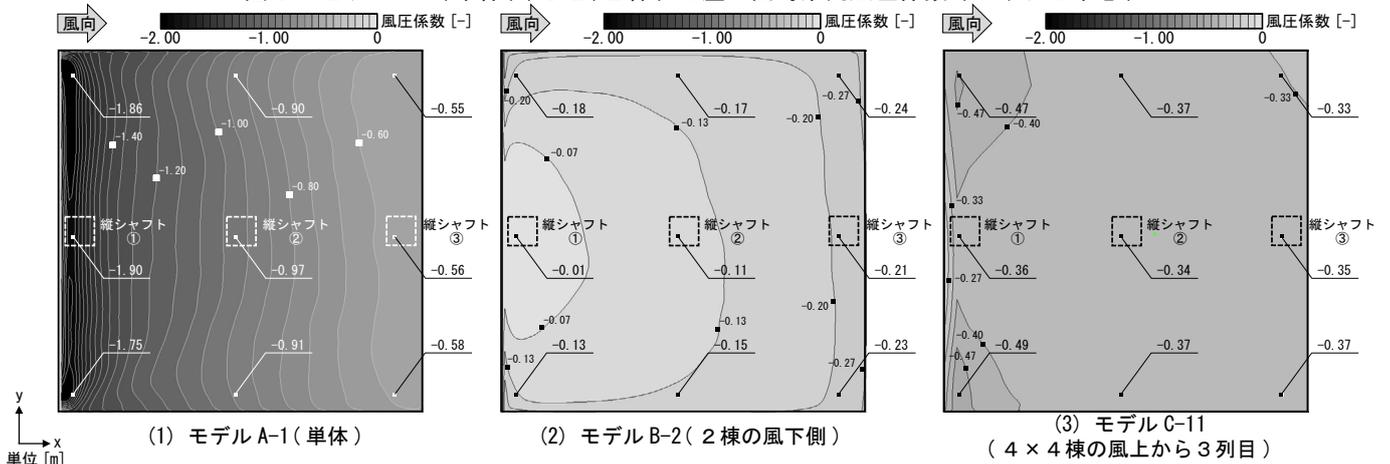
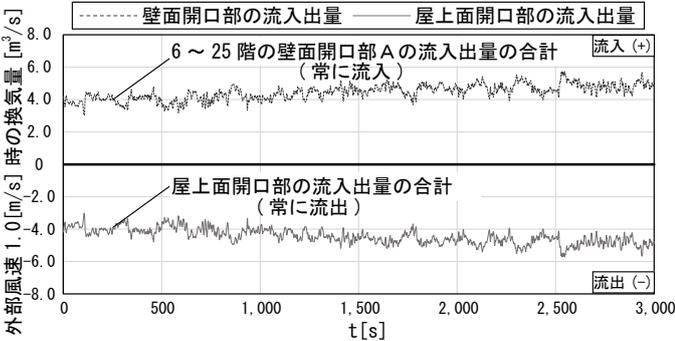


図6 モデルA-1(単体)、B-2(2棟)、C-11(4×4棟)の屋上面平均風圧係数分布

7割程度、壁面の開口部から流入する時刻が3割程度となり、流入側となる開口部の位置が頻繁に変化する。

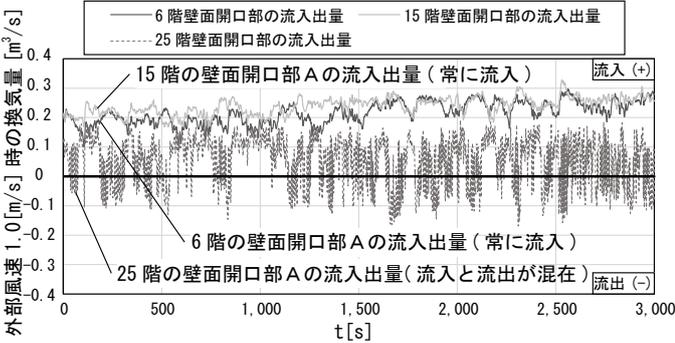
(3) モデルC-11(4×4棟)(図10)

(a) case1-2(図10(1)): 風上側壁面の開口部Aと縦シャフト②の開口部を開放した場合、瞬時換気量は屋上面の開口部から流入する時刻が8割程度、壁面の開口部から流入する時刻が2割程度となり、流入側となる開口部の位置が頻繁に変化する。



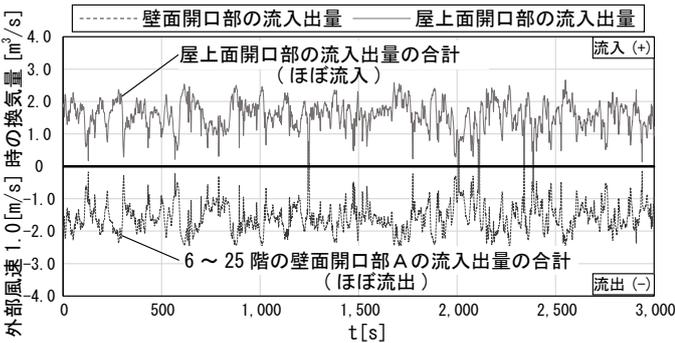
(1) case1-2(モデルA-1)

図7 モデルA-1(単体)の壁面開口部(6~25階の合計)及び屋上面開口部の流入流出時系列データ



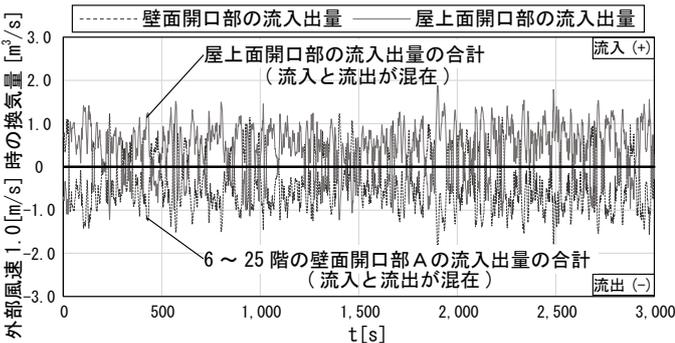
(1) case1-2(モデルA-1)

図8 モデルA-1(単体)の壁面開口部(6、15、25階)の流入流出時系列データ



(1) case1-2(モデルB-2)

図9 モデルB-2(2棟)の壁面開口部(6~25階の合計)及び屋上面開口部の流入流出時系列データ



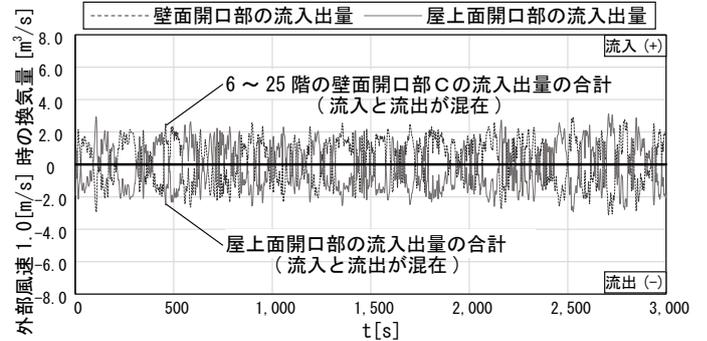
(1) case1-2(モデルC-11)

図10 モデルC-11(4×4棟)の壁面開口部(6~25階の合計)及び屋上面開口部の流入流出時系列データ

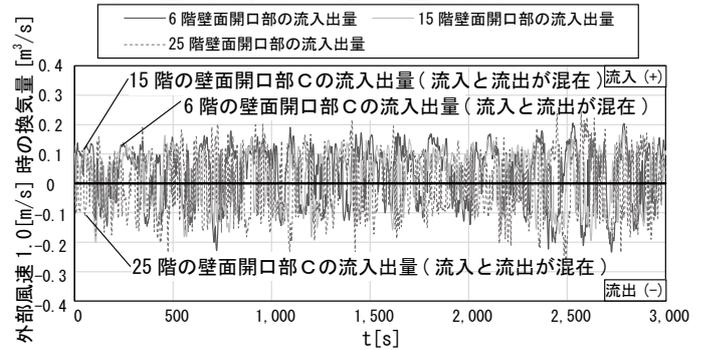
開口部の位置が頻繁に変化する。

(b) case3-2(図10(2)): 風向と平行な開口部Cと縦シャフト②の開口部を開放した場合、瞬時換気量は壁面の開口部と屋上面の開口部から流入する時刻が同程度となり、流入側となる開口部の位置が頻繁に変化する。

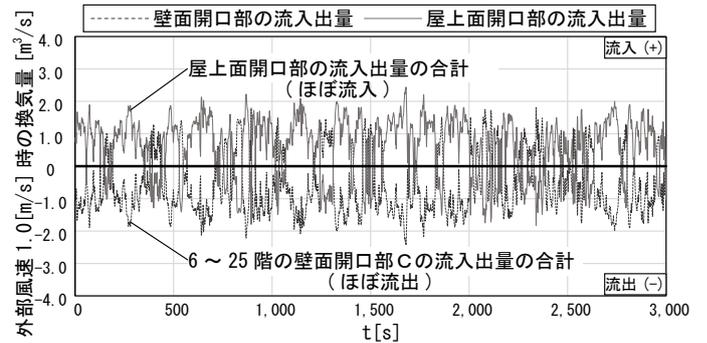
4.2 風圧変動を考慮した換気量: 図11にモデルA-1(単体)、B-2(2棟)、C-11(4×4棟)の平均圧



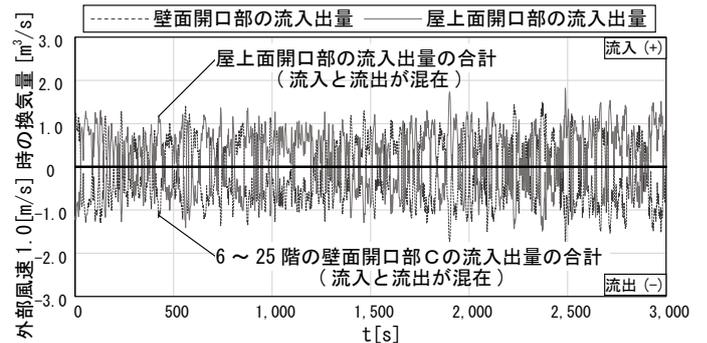
(2) case3-2(モデルA-1)



(2) case3-2(モデルA-1)



(2) case3-2(モデルB-2)



(2) case3-2(モデルC-11)

力差から算出した換気量^{※4}と変動を考慮した換気量^{※5}の比較を示す。

(1) モデル A-1(単体)(図 11(1))

(a) case1(風上側壁面の開口部 A を開放した場合): case1 では、平均圧力差から算出した換気量は 3.99~5.44[m³/s]、変動を考慮した換気量は 3.97~5.37[m³/s] となる。流入側となる開口部の位置が時間的に変化しないため、平均圧力差から算出した換気量と変動を考慮した換気量に差はほぼ無い。

(b) case2(風下側壁面の開口部 B を開放した場合): case2 では、縦シャフト①、②を開放した場合、平均圧力差から算出した換気量は 2.17~3.75[m³/s]、変動を考慮した換気量は 2.15~3.82[m³/s] となり、平均圧力差から算出した換気量と変動を考慮した換気量に差はほぼ無い。縦シャフト③を開放した場合、平均圧力差から算出した換気量は 0.78[m³/s]、変動を考慮した換気量は 1.36[m³/s] となり、平均圧力差から算出した換気量に対して変動を考慮した換気量が約 1.7 倍となる。

(c) case3(風向と平行な壁面の開口部 C を開放した場合): case3 では、縦シャフト①、③を開放した場合、平均圧力差から算出した換気量は 1.99~3.09[m³/s]、変

動を考慮した換気量は 2.00~3.36[m³/s] となり、平均圧力差から算出した換気量と変動を考慮した換気量に差はほぼ無い。縦シャフト②を開放した場合、平均圧力差から算出した換気量は 0.98[m³/s]、変動を考慮した換気量は 1.71[m³/s] となり、平均圧力差から算出した換気量に対して変動を考慮した換気量が約 1.8 倍となる。

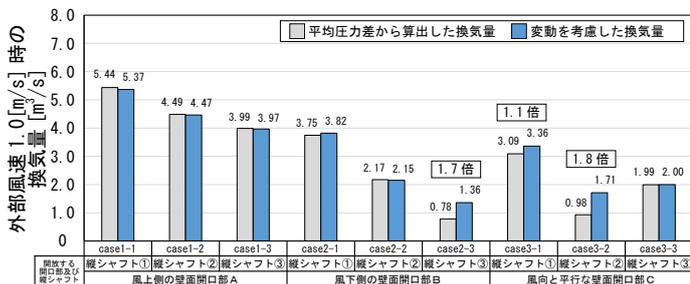
モデル A-1 では屋上面の負圧が大きく、ほとんどの case で流入側となる開口部の位置が変化しないため、平均圧力差から算出した換気量と変動を考慮した換気量に差はほぼ無い。

(2) モデル B-2(2棟)(図 11(2))

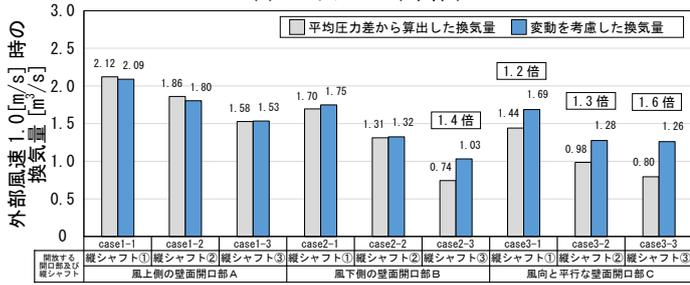
(a) case1(風上側壁面の開口部 A を開放した場合): case1 では、平均圧力差から算出した換気量は 1.58~2.12[m³/s]、変動を考慮した換気量は 1.53~2.09[m³/s] となる。どの case でも流入側となる開口部の位置が変化しないため、平均圧力差から算出した換気量と変動を考慮した換気量に差はほぼ無い。

(b) case2(風下側壁面の開口部 B を開放した場合): case2 では、縦シャフト①、②を開放した場合、平均圧力差から算出した換気量は 1.31~1.70[m³/s]、変動を考慮した換気量は 1.32~1.75[m³/s] となり、平均圧力差から算出した換気量と変動を考慮した換気量に差はほぼ無い。縦シャフト③を開放した場合、平均圧力差から算出した換気量は 0.74[m³/s]、変動を考慮した換気量は 1.03[m³/s] となり、平均圧力差から算出した換気量に対して変動を考慮した換気量が約 1.4 倍となる。

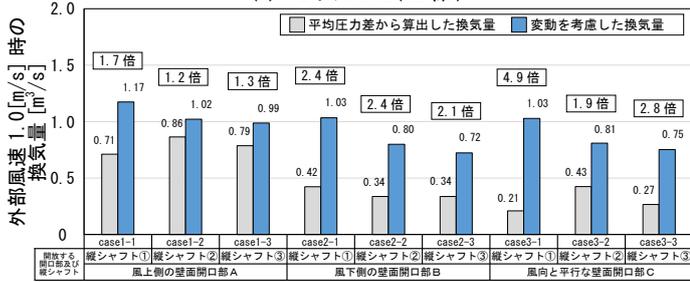
(c) case3(風向と平行な壁面の開口部 C を開放した場合): case3 では、平均圧力差から算出した換気量は 0.80~1.44[m³/s]、変動を考慮した換気量は 1.26~1.69[m³/s] となり、平均圧力差から算出した換気量に対して変動を



(1) モデル A-1(単体)

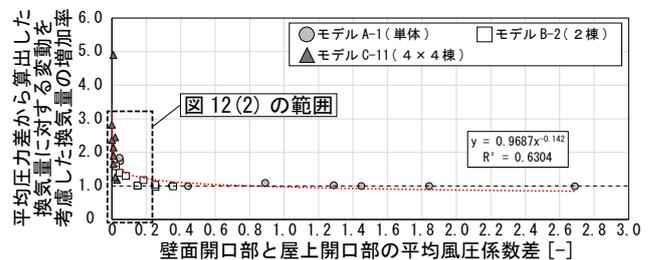


(2) モデル B-2(2棟)

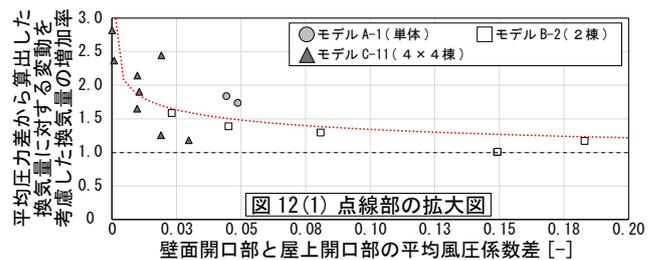


(3) モデル C-11(4×4棟)

図 11 モデル A-1(単体)、B-2(2棟)、C-11(4×4棟)の平均圧力差から算出した換気量^{※4}と変動を考慮した換気量^{※5}の比較



(1) 開口間の平均風圧係数差 (0 ~ 3.00[-])



(2) 開口間の平均風圧係数差 (0 ~ 0.20[-])

図 12 開口間の代表平均風圧係数差と換気量の関係

考慮した換気量が約 1.2 ～ 1.6 倍となる。

モデル B-2 では、風下側の壁面開口部 B を開放した case2 と風向と平行な壁面の開口部 C を開放した case3 で変動を考慮した換気量が増加する。case2 では約 1.4 倍、case3 では約 1.2 ～ 1.6 倍の増加率となる。

(3) モデル C-11 (4 × 4 棟) (図 11(3))

(a) case1 (風上側壁面の開口部 A を開放した場合): case1 では、平均圧力差から算出した換気量は 0.71 ～ 0.86[m³/s]、変動を考慮した換気量は 0.99 ～ 1.17[m³/s] となり、平均圧力差から算出した換気量に対して変動を考慮した換気量が約 1.2 ～ 1.7 倍となる。

(b) case2 (風下側壁面の開口部 B を開放した場合): case2 では、平均圧力差から算出した換気量は 0.34 ～ 0.42[m³/s]、変動を考慮した換気量は 0.72 ～ 1.03[m³/s] となり、平均圧力差から算出した換気量に対して変動を考慮した換気量が約 2.1 ～ 2.4 倍となる。

(c) case3 (風向と平行な壁面の開口部 C を開放した場合): case3 では、平均圧力差から算出した換気量は 0.21 ～ 0.43[m³/s]、変動を考慮した換気量は 0.75 ～ 1.03[m³/s] となり、平均圧力差から算出した換気量に対して変動を考慮した換気量が約 1.9 ～ 4.9 倍となる。

モデル C-11 では、どの case でも平均圧力差から算出した換気量に比較して変動を考慮した換気量が増加する。流入側となる開口部の位置が時間的に変化し、増加率は約 1.2 ～ 2.4 倍となるが、case3-1、3-3 では変動を考慮した換気量が約 2.8 倍、4.9 倍と大きくなる場合がある。

4.3 開口間の平均風圧係数差と換気量の関係: 図 12

に開口間の代表平均風圧係数差と換気量の関係を示す。代表平均風圧係数差は各階開口部中心点と屋上面開口部 (エリア a ～ d) 中心点の風圧係数差の平均値とする。平均風圧係数差が 0.20 以上の場合、平均圧力差から算出した換気量と変動を考慮した換気量は殆ど変わらない。平均風圧係数差が 0.05 ～ 0.20 程度の場合、変動を考慮した換気量は平均圧力差から算出した換気量の約 1.1 ～ 1.5 倍程度となる。平均風圧係数差が 0.05 以下の場合、変動を考慮した換気量は平均圧力差から算出した換気量の約 1.5 ～ 4.8 倍となる。モデル A-1 では平均風圧係数差が 0.20 以上になる場合が多い。モデル B-2、C-11 では平均風圧係数差が 0.20 以下となる場合が多い (図 12(2))、周辺に同じ程度の高さの建物が存在する場合、風圧変動を考慮して換気量を求める必要があると考えられる。

5 まとめ

5.1 LES 解析結果

①モデル A-1 の屋上風圧係数は風上側で剥離域が存在

するため、-1.75 ～ -1.90 程度となり、風下側に比較して負圧が大きく、時間的な変動も大きい。

②モデル B-2 の屋上風圧係数はモデル A-1 に比較して風圧係数の分布が小さい。モデル A-1 と同様に、屋上面風上側の風圧係数の時間的な変動が大きい。

③モデル C-11 の屋上風圧係数はモデル A-1、B-2 に比較して風圧係数の分布が極めて小さい。

5.2 時系列換気量の算出結果

①モデル A-1 の瞬時換気量は、case1 では、常に殆どの壁面開口部から流入するが、case3 では屋上の開口部から流入する時刻がある。

②モデル B-2 の瞬時換気量は、case1 では殆どの時刻で屋上の開口部から流入する。case3 では、壁面の開口部から流入する時刻が 3 割程度である。

③モデル C-11 の瞬時換気量は、壁面の開口部と屋上の開口部から流入する時刻が同程度であり、流入側となる開口部の位置が頻繁に変化する。

5.3 風圧変動を考慮した換気量

①モデル A-1 では殆どの case で平均圧力差から算出した換気量と変動を考慮した換気量に差はほぼない。case2-3、3-2 では、平均圧力差から算出した換気量に比較して変動を考慮した換気量が約 1.1 ～ 1.8 倍となる。

②モデル B-2 では殆どの case で平均圧力差から算出した換気量に比較して変動を考慮した換気量が増加し、case2 では約 1.4 倍、case3 では約 1.2 ～ 1.6 倍となる。

③モデル C-11 では、どの case でも平均圧力差から算出した換気量に比較して変動を考慮した換気量が増加する。モデル A-1、B-2 に比較して増加率が大きく、約 1.2 ～ 2.4 倍となる場合が多い。case3-1、3-3 のような平均圧力差から算出した換気量が少ない場合は、約 4.9 倍、2.8 倍の増加率となる場合もある。

5.4 平均風圧係数差と換気量の関係

①平均風圧係数差が 0.20 以上の場合、平均圧力差から算出した換気量と変動を考慮した換気量は殆ど変わらない。平均風圧係数差が 0.20 以下の場合、変動を考慮した換気量は平均圧力差から算出した換気量に比較して約 1.1 ～ 4.8 倍となる。周辺に同じ程度の高さの建物が存在する場合、変動を考慮した換気量の検討が必要であると考えられる。

注釈

※1 ドライバー領域は、周期境界条件で変動気流流入境界条件を計算するために、建物風上側に設けた領域である。

※2 屋上面では同一開口面内に圧力分布が生じる箇所があるため、開口面を 4 分割して風圧係数を算出する。

※3 瞬時風圧係数を用いて各時刻ごとに算出した流入量とする。

※4 平均風圧係数を用いて算出した建物に対する流入量とする。

※5 瞬時風圧係数を用いて算出した建物に対する流入量の積算値を時間平均したものとする。

参考文献

文1) 赤林、有波ら「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 による住宅の自然換気・通風性に関する研究 その2」日本建築学会環境系論文集、2016年
文2) 赤林・水越・有波・佐藤「自然風による非常換気に関する研究 その1 単独及び複数建物モデルを対象とした風圧変動による自然換気」日本建築学会学術講演梗概集、2019年