自然換気の非定常性に関する研究

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

水越　裕紀　　指導教員　赤林　伸一　教授

1　研究目的

近年、オフィスビル等では自然エネルギーの有効活用方法の一つとして換気口を利用した自然換気が導入されている。自然換気は夏季の夜間や中間期に外部風を利用して換気を行うことで、冷房や機械換気によるエネルギー消費量の削減、室内環境の快適性の維持等が期待でき、自然換気を高層建物に採用する事例も多く見られる。

しかし、これまで自然換気量の算出・評価には定常状態の壁面における平均風圧係数が用いられており、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。圧力変動による換気量は平均的な圧力差による換気量の約１割程度[文1)]と推察されるが、風向や換気口の配置によっては開口間の平均圧力差が殆ど無い条件でも風圧変動を考慮することで無視することができない換気量が生じる可能性があると考えられる。従って、外部風の変動によって生じる換気量に関する検討を行う必要がある。

本研究では、平均風圧による換気量に対して瞬時風圧による換気量の算出を行うことで、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。外部風による風速、風圧の時間変動を解析することができる Large-Eddy Simulation（以下：LES）を用いて単独及び複数の建物モデルを対象とした解析を行い、算出された壁面の時系列圧力データから風圧係数を算出する。算出された風圧係数を基に換気回路網計算を行い、平均風圧及び風圧変動による自然換気量の算出を行う。

2　数値流体解析の概要

2.1　解析対象：表１に計算 case を図１に解析対象領域を、図２に建物モデルの概要を示す。解析対象領域は、実スケールで 3,900[m](x) × 900[m](y) × 900[m](z) とする。建物モデルの寸法は、50[m](x) × 50[m](y) × 100[m](z) とする。case1 は建物モデルを１棟（model-A）、case2 は風上側と風下側に建物モデル２棟を風向に対して直列に配置し、隣棟間隔は 25[m] とする。風上側建物モデルを model-B、風下側建物モデルを model-C とする。case3 は建物モデルを４×４棟整列配置した市街地モデルとする。各建物モデルの隣棟間隔は xy 方向ともに 25[m] とする。風上側から建物モデルをそれぞれ model-D ～ model-S とする。

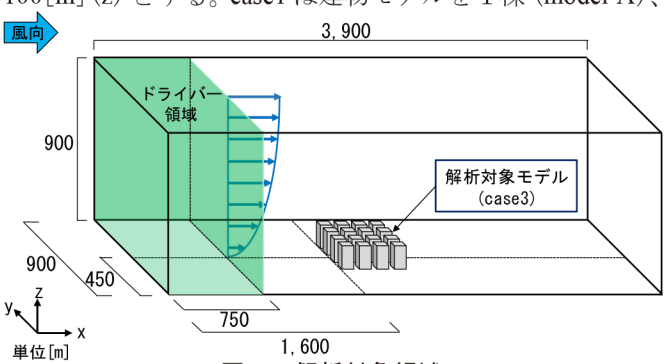


図１　解析対象領域

2.2　LES 解析条件：表２に解析条件を示す。LES 解析の長さと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 STREAM ver.13 を使用する。subgrid scale モデル（SGS モデル）には 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。解析では、ドライバー領域※1を設け、流入変動気流を作成し、対象とする建物モデルに対して変動気流を流入させて解析する。ドライバー領域による変動気流の作成には片岡ら[文2)]の方法を用いる。解析開始からの経過時間を t とし、計算開始後 t=0 ～ 2,000[s] までを流入変動気流作成のためのプレ解析とし、t=2,000 ～ 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）を想定する。基準風速は基準高さ 500[m] で 5.0[m/s] とする。

表１　計算 case

		対象建物モデル	換気回路網モデル	開口条件
case1	case1-1	１棟 model-A	モデル１	0.5[m]×0.5[m] 流量係数 α:0.6[-]
	case1-2		モデル２	
case2	case2-1	２棟 model-B(風上側)	モデル１	
	case2-2		モデル２	
	case2-3	２棟 model-C(風下側)	モデル１	
	case2-4		モデル２	
case3	case3-1	市街地モデル model-D	モデル１	
	case3-2		モデル２	
	case3-3	市街地モデル model-E	モデル１	
	case3-4		モデル２	
	case3-5	市街地モデル model-F	モデル１	
	case3-6		モデル２	
	case3-7	市街地モデル model-G	モデル１	
	case3-8		モデル２	
	case3-9	市街地モデル model-H	モデル１	
	case3-10		モデル２	
	case3-11	市街地モデル model-I	モデル１	
	case3-12		モデル２	
	case3-13	市街地モデル model-J	モデル１	
	case3-14		モデル２	
	case3-15	市街地モデル model-K	モデル１	
	case3-16		モデル２	
	case3-17	市街地モデル model-L	モデル１	
	case3-18		モデル２	
	case3-19	市街地モデル model-M	モデル１	
	case3-20		モデル２	
	case3-21	市街地モデル model-N	モデル１	
	case3-22		モデル２	
	case3-23	市街地モデル model-O	モデル１	
	case3-24		モデル２	
	case3-25	市街地モデル model-P	モデル１	
	case3-26		モデル２	
	case3-27	市街地モデル model-Q	モデル１	
	case3-28		モデル２	
	case3-29	市街地モデル model-R	モデル１	
	case3-30		モデル２	
	case3-31	市街地モデル model-S	モデル１	
	case3-32		モデル２	

2.3　基準動圧及び風圧係数の算出方法：図３に流入変動気流の鉛直プロファイルを示す。風圧係数の算出に用いる基準動圧は、一般的に建物が無い場合の軒高風速より算出するが、LES の解析条件により軒高風速に若干の差が生じるため、上空（x=750[m]、y=450[m]、z=500[m]）の平均風速を基準風速（5.0[m/s]）とし、(1) 式を用いて算出する。風圧係数は (2) 式を用いて、(1) 式より算出した基準動圧で壁面静圧を除すことで算出する。

$$p_{v0} = \frac{1}{2}\rho {v_0}^2 \,[\mathrm{Pa}] \quad \cdots (1) \qquad Cp = \frac{P_w}{P_{vo}}\,[-] \quad \cdots (2)$$

p_{v0} :基準動圧[Pa]　ρ :空気密度[kg/m³]　v_0 :基準風速[m/s]
C_p :風圧係数[-]　P_w :壁面静圧[Pa]

2.4　換気経路の概要：図４に開口位置と換気経路の概要を示す。換気計算対象建物は１棟及び２棟、市街地モデル（計１６棟）とする。換気経路は、対象建物の風向に対して垂直な風上・風下側壁面中央（y=25[m]、z=50[m]）に開口部①、②を設けたモデルを換気経路１、風向に対して平行な壁面の中央（x=25[m]、z=50[m]）に開口部③、④を設けた換気経路２とする。開口部は、0.5[m]（幅）× 0.5[m]（高さ）とし、流量係数は 0.6[-] とする。対象フロアは、25 階建ての 13 階（50[m](x) × 50[m](y) × 4.0[m]）とし、地表面から高さ 50[m] の中心に開口部を設置する。

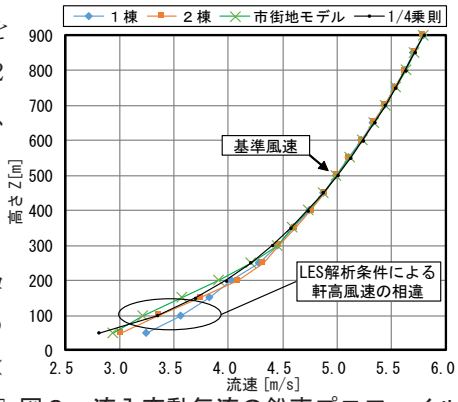
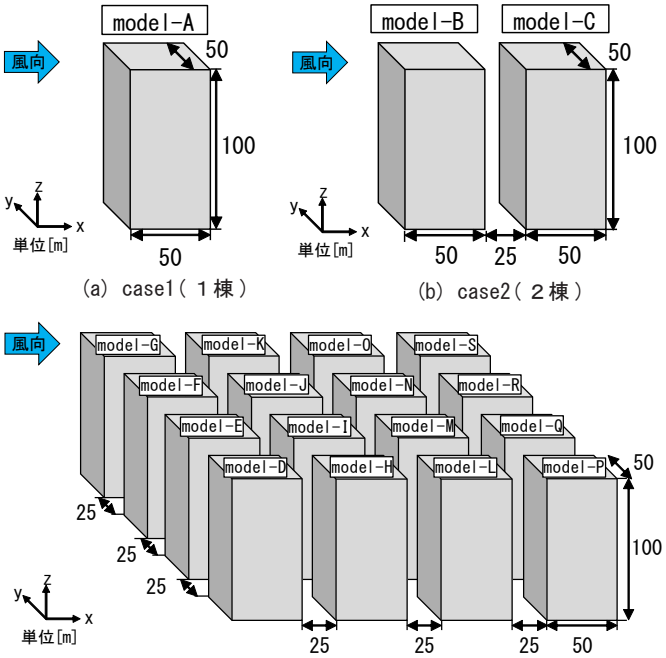


図３　流入変動気流の鉛直プロファイル



(a) case1（１棟）　(b) case2（２棟）

(c) case3（市街地モデル）

図２　建物モデルの概要

2.5　換気量の算出方法：LES により算出した瞬時風圧係数を用いて、平均風圧係数及び瞬時風圧係数による換気量を換気回路網計算ソフト COMIS により算出する。換気量は開口部①及び③からの流入量を正、開口部②及び④からの流入量を負とする。

3　LES 解析結果

3.1 風圧係数の時間変化：図５に各開口部中心の風圧係数の時間変化を示す。

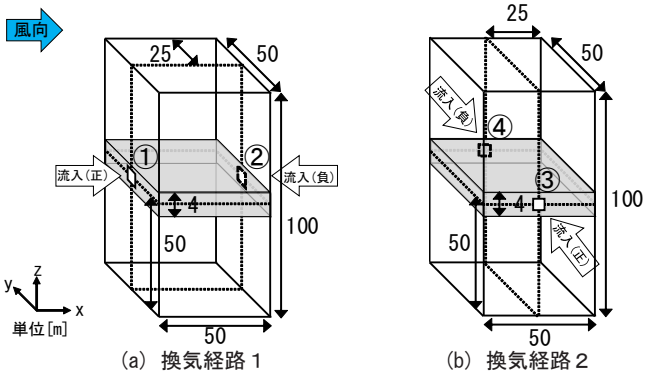
（１）単体の場合（case1）

(a) case1-1（model-A　図５(a)）：風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合、開口部①（風上側）の風圧係数は開口部②（風下側）の風圧係数より常に大きく、開口部①と②の風圧係数差は 0.5 ～ 1.2 程度である。風圧係数の平均値は開口部①（風上側）で 0.43、開口部②（風下側）で -0.21 であり、平均風圧係数差は 0.64 となる。

(b) case1-2（model-A　図５(b)）：風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合、開口部③と④の風圧係数は -0.1 ～ -0.9 の範囲で時間的に変動する。開口部③と④の風圧係数差は 0 ～ 0.5 の範囲で変動し、case1-1 と比較して相対的に小さい。風圧係数の平均値は開口部③で -0.40、開口部④で -0.43 であり、平均風圧係数差は 0.03 と case1-1 と比較して極めて小さい。

（２）２棟の場合（case2, 風下側建物）

(a) case2-3(model-C 図５(c))：風下側建物モデルでは、風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合、開口部②



(a) 換気経路１　(b) 換気経路２

図４　開口位置と換気経路の概要

表２　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	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 Werner-Wengel
		流体と接する全ての面	
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	case1	260(x)×197(y)×103(z)=5,275,660	
	case2	355(x)×197(y)×103(z)=7,203,305	
	case3	482(x)×220(y)×103(z)=10,922,120	

（風下側）の風圧係数は開口部①（風上側）の風圧係数より大きく、開口部①と②の風圧係数差は 0 ～ 0.2 程度であり、風下側開口から流入する場合が殆どである。開口部①と②の平均風圧係数差は 0.07 と case1-1（model-A）と比較して極めて小さい。

(b) case2-4（model-C 図５(d)）：風下側建物モデルでは、風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合、開口部③と④の風圧係数は 0 ～ -0.3 の範囲で時間的に変化し、開口部③と④の風圧係数差は 0 ～ 0.3 程度となり case2-3 と同様となる。開口部③と④の平均風圧係数差は 0.03 となり、case1-2（model-A）と同じである。

（３）市街地モデル（整列配置）の場合（case3）

(a) case3-21（model-N 図５(e)）：風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合、開口部②（風下側）は開口部①（風上側）に比較して相対的に風圧係数が大きく、風下側開口から流入する割合が多い。開口部①と②の風圧係数は -0.1 ～ -0.3 程度の範囲で変動しており、風圧係数の平均値は、開口部①（風上側）で -0.18、開口部②（風下側）で -0.15 である。開口部①と②の平均風圧係数差は 0.03 となり、case1-1（model-A）に比較して極めて小さく、case1-2（model-A）、case2-4（model-C）と同じ風圧係数差となる。

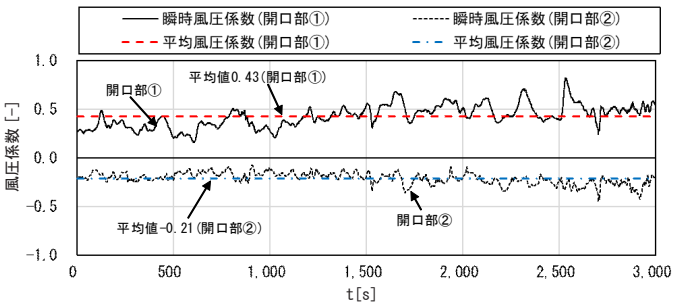
(b) case3-22（model-N 図５(f)）：風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合、開口部③と④の風圧係数は -0.1 ～ -0.3 程度の範囲で変動している。風圧係数の平均値は、開口部③で -0.16、開口部④で -0.17 であり、平均風圧係数差はほぼ 0 となる。風上から３棟目の model-N では建物モデル単体及び２棟の場合と比較して、開口条件の違いによる風圧係数の時間変化に差はみられない。

4 換気量の算出結果

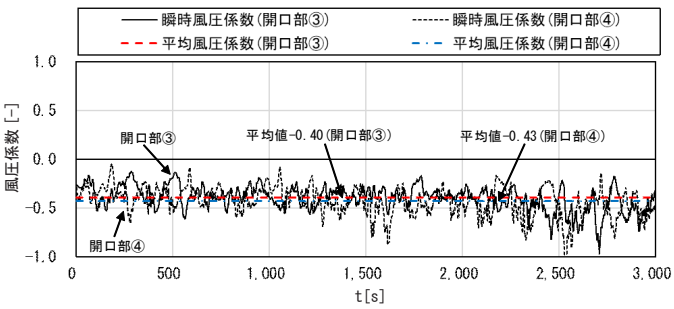
4.1 換気量の比較：図６に各 case の換気量※2 を示す。尚、換気量は各 case において気流が建物の影響を受けない上空（x=750[m]、y=450[m]、z=500[m]）の基準風速（5.0[m/s]）で各換気量を除すことにより外部基準風速 1.0[m/s] 時の換気量及び換気回数で示す。

（１）単体の場合（case1）

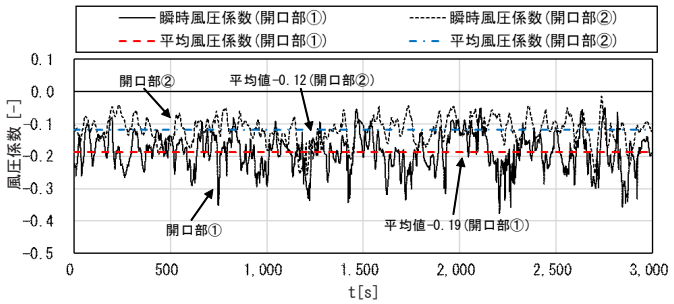
(a) case1-1（model-A, 図６(a)）：風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合、平均換気回数は 0.027[回/h]



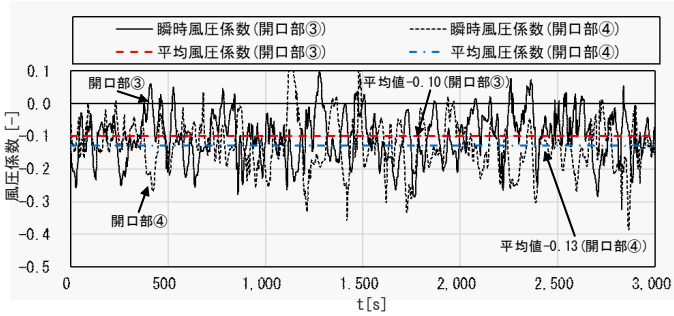
(a) case1-1（風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合　model-A）



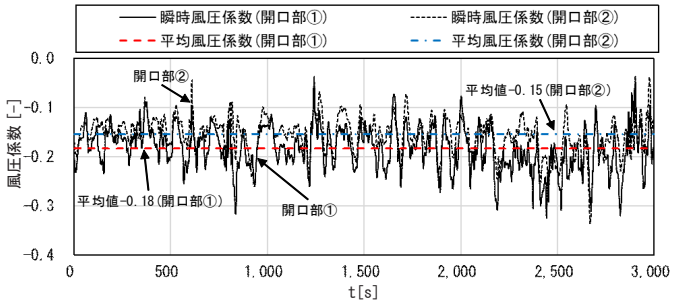
(b) case1-2（風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合　model-A）



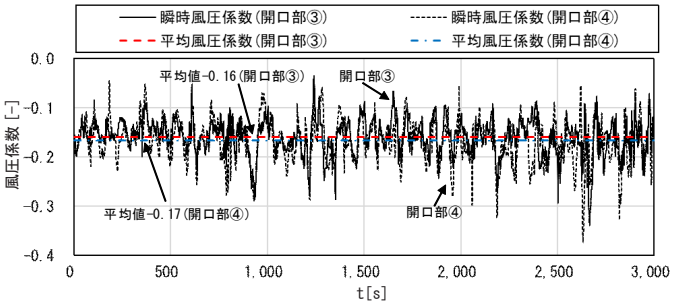
(c) case2-3（風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合　model-C）



(d) case2-4（風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合　model-C）



(e) case3-21（風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合　model-N）



(f) case3-22（風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合　model-N）

図５　各開口部中心の風圧係数の時間変化

である。変動係数※3は 11.3[%] と変動が小さい。どの時刻でも風上側の開口部①から流入し開口部②から流出する。

(b) case1-2（model-A, 図６(b)）：風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合、平均換気回数は 0.013[回 /h] であり、case1-1 に比較して約 0.5 倍になる。変動係数は 42.0[%] と case1-1 に比較して約 3.7 倍になる。気流が流入、流出する開口部が時間的に変化し、開口部③と④から交互に気流が流入・流出する。

（２）２棟の場合（case2）

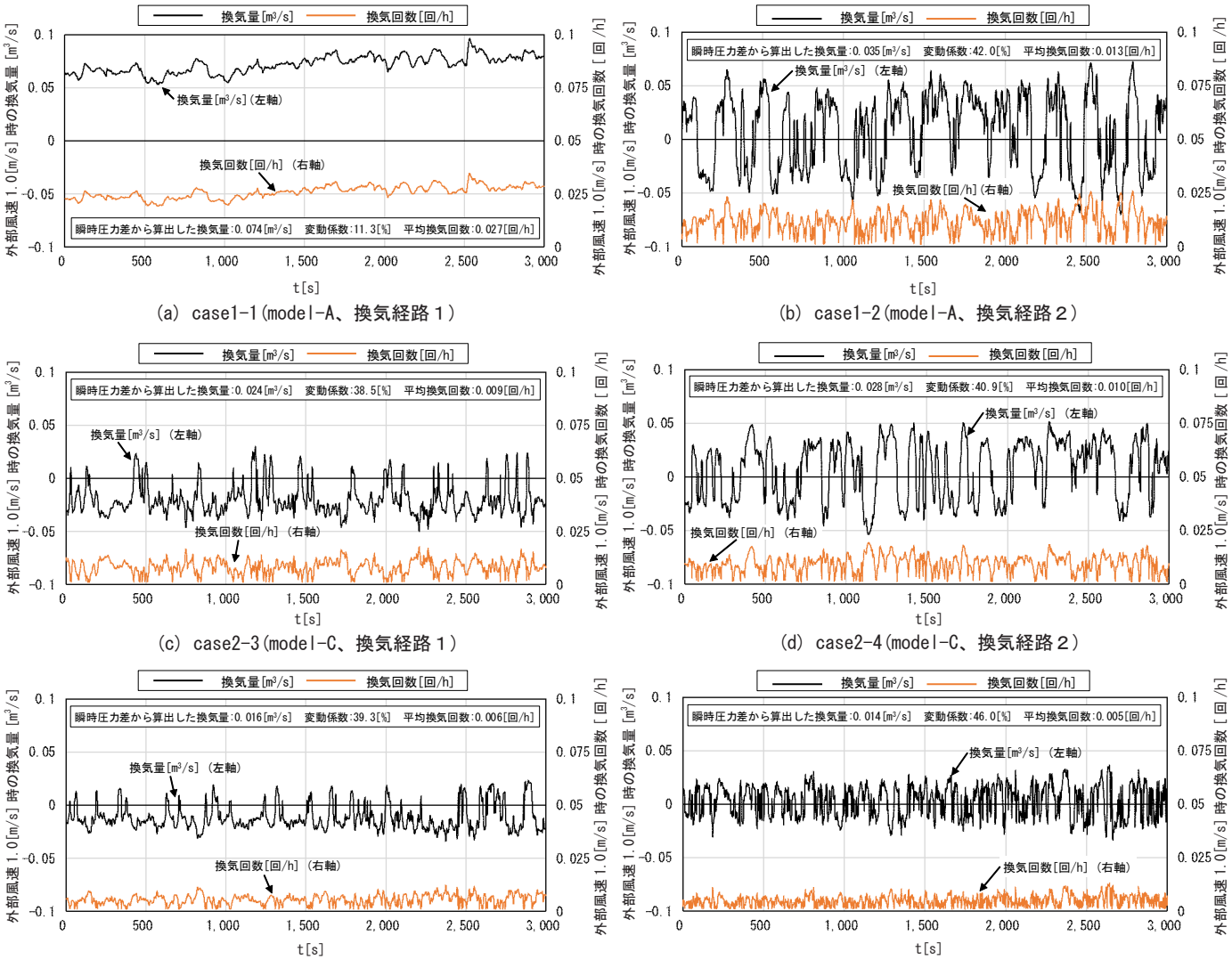
(a) case2-3(model-C, 風下側建物 図６(c))：風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合、開口部②から流入し、開口部①から流出する風向に対して逆方向の気流が生じる。また、平均換気回数は 0.009[回 /h]、変動係数は 38.5[%] である。case1-1(model-A) と比較して平均換気回数は 0.3 倍程度となり、変動係数は大きくなる。

(d) case2-4(model-C, 風下側建物 図６(d))：風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合、case1-2(model-A) と同様に気流が流入・流出する開口部が時間的に変化し、開口部③と④から交互に流入する気流が生じる。また、平均換気回数は 0.010[回 /h]、変動係数は 40.9[%] であり、case1-2（model-A）、case2-3(model-C) と同様の換気回数及び変動係数となる。

（３）市街地モデル（整列配置）の場合（case3）

(a) case3-21(model-N, 図６(e))：風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合、平均換気回数は 0.006[回 /h]、変動係数は 39.3[%] となる。風上側開口に比較して風下側開口から流入する割合が大きくなる。同じ開口条件である case1-1(model-A) と比較して平均換気回数は 0.2 倍程度となり、開口条件が異なる case1-2(model-A) と比較して 0.5 倍程度となる。

(b) case3-22(model-N, 図６(f))：風向に対して平行な壁面に開口を設けた場合、平均換気回数は 0.005[回 /h]、変動係数は 46.0[%] となる。case3-21(model-N) と比較して同様の換気回数となる。流入、流出する開口部が時間的に変化し、開口部③と④から交互に気流が流入する。



(a) case1-1(model-A、換気経路１)　(b) case1-2(model-A、換気経路２)

(c) case2-3(model-C、換気経路１)　(d) case2-4(model-C、換気経路２)

(e) case3-21(model-N、換気経路１)　(f) case3-22(model-N、換気経路２)

図６　各 case の換気量※2

同じ開口条件である case1-2（model-A）、case2-4（model-C）と比較して平均換気回数は 0.4 ～ 0.6 倍となる。風上側から３棟目では風向に対し垂直に開口を設けた場合と風向に対し平行に開口を設けた場合の平均換気回数に差はない。

4.2　風圧変動を考慮した換気量：図７に各 case の瞬時圧力差から算出した換気量※4 と平均圧力差から算出した換気量※5 を示す。

（１）単体の場合（case1）

(a)　風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合：case1-1（model-A）では、瞬時圧力差から算出した換気量は 0.074［m^3/s］、平均圧力差から算出した換気量は 0.072［m^3/s］であり、換気量算出方法の違いによる換気量に差はない。

(b)　風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合：case1-2（model-A）では、瞬時圧力差から算出した換気量は 0.035［m^3/s］、平均圧力差から算出した換気量は 0.016［m^3/s］であり、瞬時圧力差から算出した換気量は平均圧力差から算出した換気量の約 2.2 倍となる。開口間の風圧係数差が殆どない開口条件でも圧力変動を考慮することである程度の換気量が確保できる。

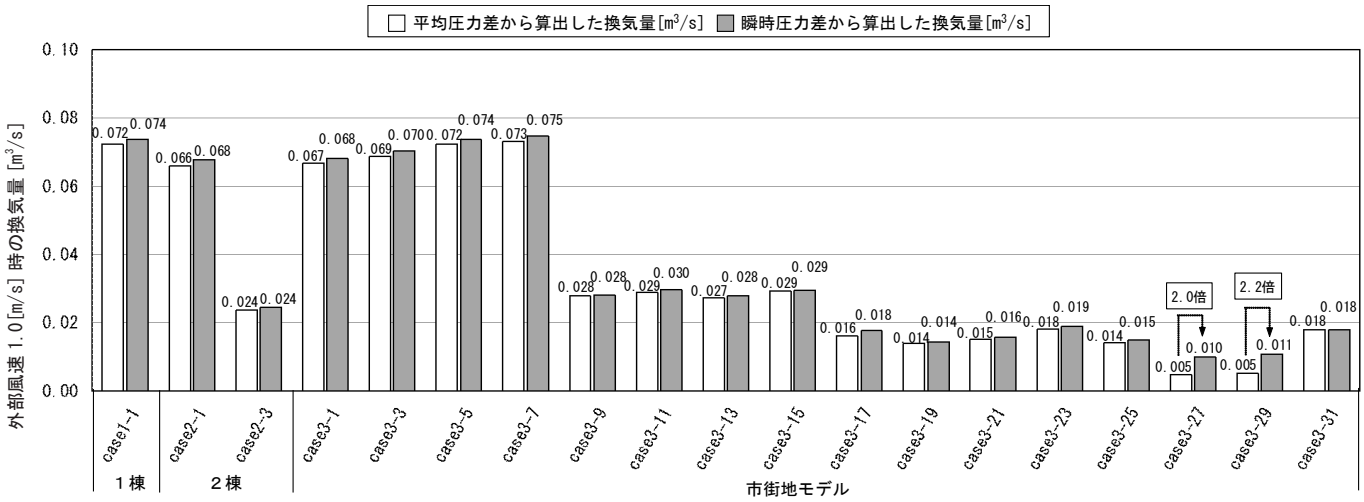
（２）２棟の場合（case2）

(a)　風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合：case2-3（model-C）では瞬時圧力差から算出した換気量は 0.024［m^3/s］、平均圧力差から算出した換気量は、0.024［m^3/s］であり、case1-1（model-A）の場合と同様に換気量算出方法の違いによる換気量に差はない。

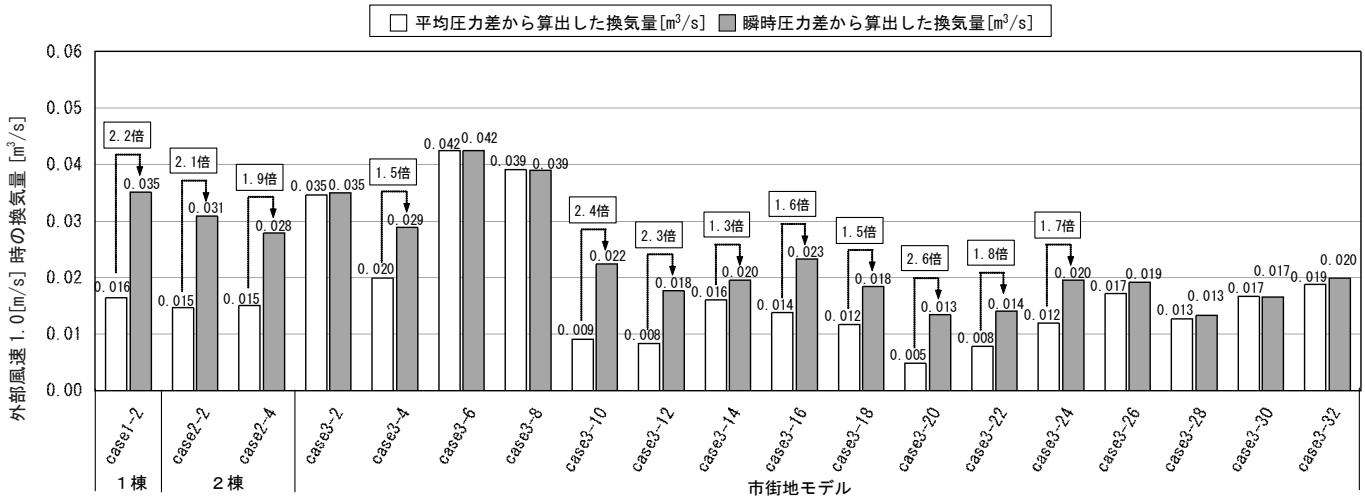
(b)　風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合：case2-4（model-C）では瞬時圧力差から算出した換気量は 0.028［m^3/s］、平均圧力差から算出した換気量は 0.015［m^3/s］であり、瞬時圧力差から算出した換気量は平均圧力差から算出した換気量の約 1.9 倍となる。case1-2(model-A）の場合と同様に圧力変動を考慮することである程度の換気量が確保できる。

（３）市街地モデル（整列配置）の場合（case3）

(a)　風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合：case3-21（model-N）では瞬時圧力差から算出した換気量は 0.016［m^3/s］、平均圧力差から算出した換気量は



(a) 換気経路１（風上、風下に開口を設置した場合）



(b) 換気経路２（風向に平行に開口を設置した場合）

図７　各 case の瞬時圧力差から算出した換気量※4 と平均圧力差から算出した換気量※5

0.015[m^3/s] であり、同じ開口条件である case1-1 (model-A) 及び case2-1 (model-B)、case2-3 (model-C) の場合と同様に換気量算出方法の違いによる換気量に差はない。

(b) 風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合：case3-22 (model-N) では瞬時圧力差から算出した換気量は 0.014[m^3/s]、平均圧力差から算出した換気量は 0.008[m^3/s] であり、瞬時圧力差から算出した換気量は平均圧力差から算出した換気量の約 1.8 倍となる。同じ開口条件である case1-2 (model-A) 及び case2-4 (model-C) の場合と同様に圧力変動を考慮することである程度の換気量が確保できる。

開口間の風圧係数に定常的に差がある場合、瞬時圧力差から算出した換気量と平均圧力差から算出した換気量は概ね同様となる。開口間の風圧係数の相対的な大小が時間的に変化し、開口間の平均圧力差が殆ど生じない場合、瞬時圧力差から算出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大きくなる。

4.3 換気量と開口間の風圧係数の比較：図 8 に換気量と開口と開口の平均風圧係数差の関係を示す。開口と開口の平均風圧係数差が 0.05 以上の場合、平均圧力差から算出した換気量に対する瞬時圧力差から算出した換気量はほぼ等しく、風圧変動を考慮した換気量に差は生じない。また、開口と開口の平均風圧係数差が 0.05 以下の場合、平均圧力差から算出した換気量に対する瞬時圧力差から算出した換気量は 1.0 ～ 2.6 倍となる。開口と開口の平均風圧係数差が 0.03 ～ 0.05 の場合、風圧変動による換気量は平均的な圧力差による換気量の約 1.0 ～ 1.9 倍、平均風圧係数差が 0.03 以下の場合、風圧変動を考慮した換気量は平均的な圧力差による換気量の約 2.0 ～ 2.7 倍の換気量が生じる。

しかし、今回計算した換気回路網モデルは、開口条件が室に対し 1 対 1 開口と単純な開口条件としているため、今後、実在オフィスビルの開口条件等を考慮し、詳細な検討が必要である。

5 まとめ

5.1 LES 解析結果

① case1 (model-A) の各開口部の風圧係数の時間変化は、風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合と風向に対し平行に開口を設けた場合に比較し、風圧係数差は 0.5 ～ 1.7 程度大きくなる。

② case2 (model-C, 風下側建物) の各開口部の風圧係数の時間変化は、風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合、風向に対して逆方向の気流が生じる。

③ case3 (市街地モデル) の各開口部の風圧係数の時間変化は、風向に対し平行に開口を設けた場合、平均風圧係数差は case1 (model-A)、case2 (model-C) と比較して極めて小さい。

5.2 換気量の算出結果

①単体及び 2 棟では、平均換気回数は風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合と風向に対して平行な壁面に開口を設けた場合に比較して約半分となる。

②市街地モデルでは、風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合と風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合に比較して開口条件の違いによる平均換気回数に差はない。

5.3 風圧変動を考慮した換気量

（1） 単体及び 2 棟

①風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合、瞬時圧力差から算出した換気量と平均圧力差より算出した換気量の変化は相対的に小さい。

②風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合、瞬時圧力差から算出した換気量は平均圧力差より算出した換気量に比較して、1.7 ～ 2.0 倍程度増加する。

（2） 市街地モデル (整列配置)

①風向に対し垂直な壁面に開口を設けた場合、瞬時圧力差から算出した換気量と平均圧力差より算出した換気量に差はない。

②風向に対し平行な壁面に開口を設けた場合、瞬時圧力差から算出した換気量は平均圧力差より算出した換気量に比較して、1.3 ～ 2.6 倍程度増加する。

5.4 換気量と開口間の風圧係数の比較

開口と開口の平均風圧係数差が 0.05 以上の場合、平均圧力差から算出した換気量に対する瞬時圧力差から算出した換気量は等しく、開口と開口の平均風圧係数差が 0.05 以下の場合は 1.0 ～ 2.6 倍となる。

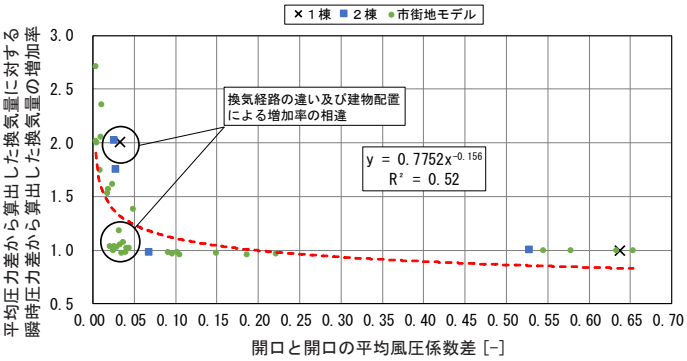


図 8 換気量と開口と開口の平均風圧係数差の関係

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 LES で算出した瞬時風圧係数を基に COMIS を用いて各時刻ごとに算出した換気量とする。
※3 変動係数は換気量の絶対値の標準偏差を瞬時圧力差から算出した換気量で除し、百分率で表す。
※4 瞬時圧力差から算出した換気量は各時刻の換気量の絶対値を積算して平均したものである。
※5 平均圧力差から算出した換気量は絶対値で表す。

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 2）片岡、水野「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、1999 年