

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非等温時における換気性状

HU JIANGING

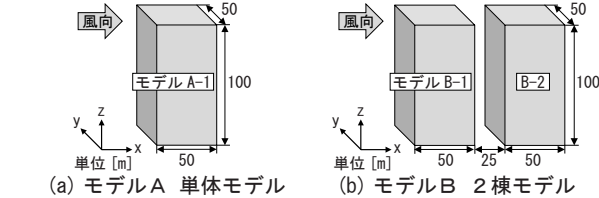
指導教員 有波 裕貴 助教

1 研究目的

近年、建物の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一つとして自然換気が用いられている。自然換気は昔から日本において中間期及び夏季の室内環境調整手段として利用されている。自然換気を利用することで冷房使用頻度を低下させ、冷房用エネルギーの削減が見込まれるため、オフィスビルや公共施設等に採用されている。

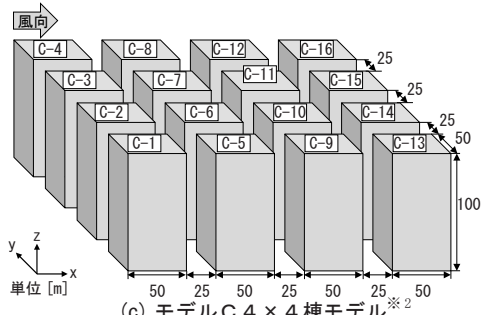
従来自然換気量の算出には時間平均圧力差が用いられており、外部風の変動により生じる圧力変動は考慮されていないのが現状である。しかし、各開口部間で生じる圧力差の時間平均値がほぼ0でも、圧力変動を考慮することで、ある程度の換気量を確保出来る可能性がある。既往の研究^{文1, 文2}では等温の条件において、建物内の各階が十分に広い階段等で接続された建物モデルを対象に風圧変動による自然換気性状の検討を行った。一方で、室内外温度差により生じる圧力差も自然換気性状に影響を与える。特に高層建物では室内外温度差による圧力差が顕著となる可能性があり、温度差及び風力による圧力差が同時に生じる場合の換気性状を検討することは、より実環境に近い条件での自然換気性状を明らかにする上で重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、風圧の時系列変動を Large-Eddy Simulation (以下:LES) を用いて解析し、算出された各階壁面と屋上面の時系列圧力データをに基づき風圧係数の時刻データおよび平均値を算出する。風圧係数及び室内外温度条件を基に建物内に縦シャフトを設置したモデルを対象に各階壁面開口部と縦シャフトの屋上開口間の圧力差を算出し、室内外温度差による圧力差と風力によ



(a) モデルA 単体モデル

(b) モデルB 2棟モデル



(c) モデルC 4×4棟モデル
 図1 解析対象モデル

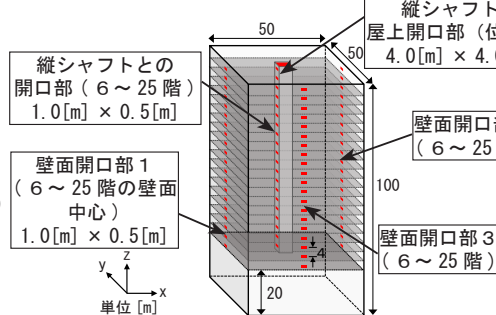


図2 建物モデルの開口部位置

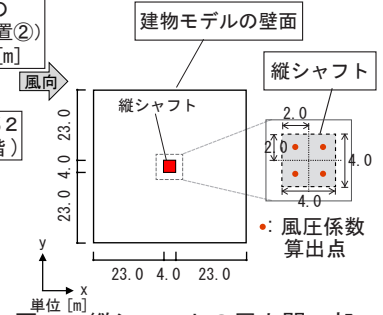


図3 縦シャフトの屋上開口部の配置と風圧係数算出点

る圧力差が同時に作用した場合の換気量の計算を行う。合計したの平均圧力差及び瞬時圧力差による換気量を比較・検討することで、風圧変動及び室内外温度差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

2.1.1 解析対象: 図1に解析対象モデルを示す。建物モデルは、50[m](x) × 50[m](y) × 100[m](z) とする。モデルA (モデルA-1) は建物単体とする。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する。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 (モデルC-1 ~モデルC-16) は建物を市街地を模擬して4×4棟 (計16棟) に整列配置し、各建物の隣棟間隔はxy方向共に25[m] とする。

2.1.2 LES解析条件: 表1にLES解析条件を示す。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) はDynamic型

表1 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]	
	建物モデル	3,900(x) × 900(y) × 900(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
	壁面境界	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	case1	260(x) × 197(y) × 103(z) = 5,275,660
	case2	355(x) × 197(y) × 103(z) = 7,203,305
	case3	482(x) × 197(y) × 103(z) = 10,922,120

表2 換気量の計算 case

計算case	温度 [°C]			壁面開口条件	風速
	室内	室外	温度差 (室内-室外)		
case1	case1-0	20	20	0(等温)	基準風速 (軒高、地上100m) を1.3, 5.10[m/s] とする
	case1-1	25	15	10	
	case1-2	27	35	-8	
	case1-3	20	0	20	
case2	case2-0	20	20	0(等温)	
	case2-1	25	15	10	
	case2-2	27	35	-8	
	case2-3	20	0	20	
case3	case3-0	20	20	0(等温)	
	case3-1	25	15	10	
	case3-2	27	35	-8	
	case3-3	20	0	20	

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領域^{*1}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。

2.2 換気回路網モデルの概要：図2に建物モデルの開口部位置、図3に縦シャフトの屋上開口部の配置と風圧係数算出点を示す。壁面開口部は風上、風下及び風向と平行な壁面中心に6階（地上22[m]）から25階（地上98[m]）まで4[m]毎に設置し、寸法は1.0[m]（幅）×0.5[m]（高さ）、流量係数 α は0.6[-] とする。建物モデル内に4.0[m]（幅）×4.0[m]（奥行）×80.0[m]（高さ）の縦シャフト^{*3}を設置し、縦シャフトの屋上開口部^{*4}は、4.0[m]（幅）×4.0[m]（奥行）とする。

2.3 換気量の算出：表2に換気量の計算 case を示す。モデルA、B、Cにおいて壁面開口部1～3をそれぞれの計算条件で1ヶ所ずつ開放する。室温25[°C]・外気温15[°C]（中間期）、室温27[°C]・外気温35[°C]（夏季）、室温20[°C]・外気温0[°C]（冬季）の3パターンの室温・

外気温を設定する。換気回路網計算ソフトCOMISを用いてLES解析で得られた各開口部及び屋上開口部の風圧係数と室内外温度を設定し、換気量の計算を行う。風圧係数には瞬時風圧係数と時間平均風圧係数を用い、両者の換気量を比較することで非等温条件における風圧変動による換気量の検討を行う。

3 解析結果

3.1 時系列換気量の算出結果：図4にモデルA-1、B-2、C-11の各温度差における壁面開口部の時系列換気量^{*5}（case1、開口部1を開放）を示す。代表階として13階、基準風速（基準高さ：軒高・地上100[m]）3及び5[m/s]場合の換気量を示す。壁面開口部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4(a, b)）：等温の場合、常に壁面開口部から流入する。case1-3（室温20[°C]、外気温0[°C]）では、室内外温度差による圧力差に外部風による圧力差が加算され、等温時と比較して換気量が増加する。一方、case1-2（室温27[°C]、外気温35[°C]）において、風速3.0[m/s]の場合では室内外温度差の影響により、常に壁面開口部で流出する。風速5.0[m/s]の場合 case1-2 では室内外温度差と外部風によって生じる圧

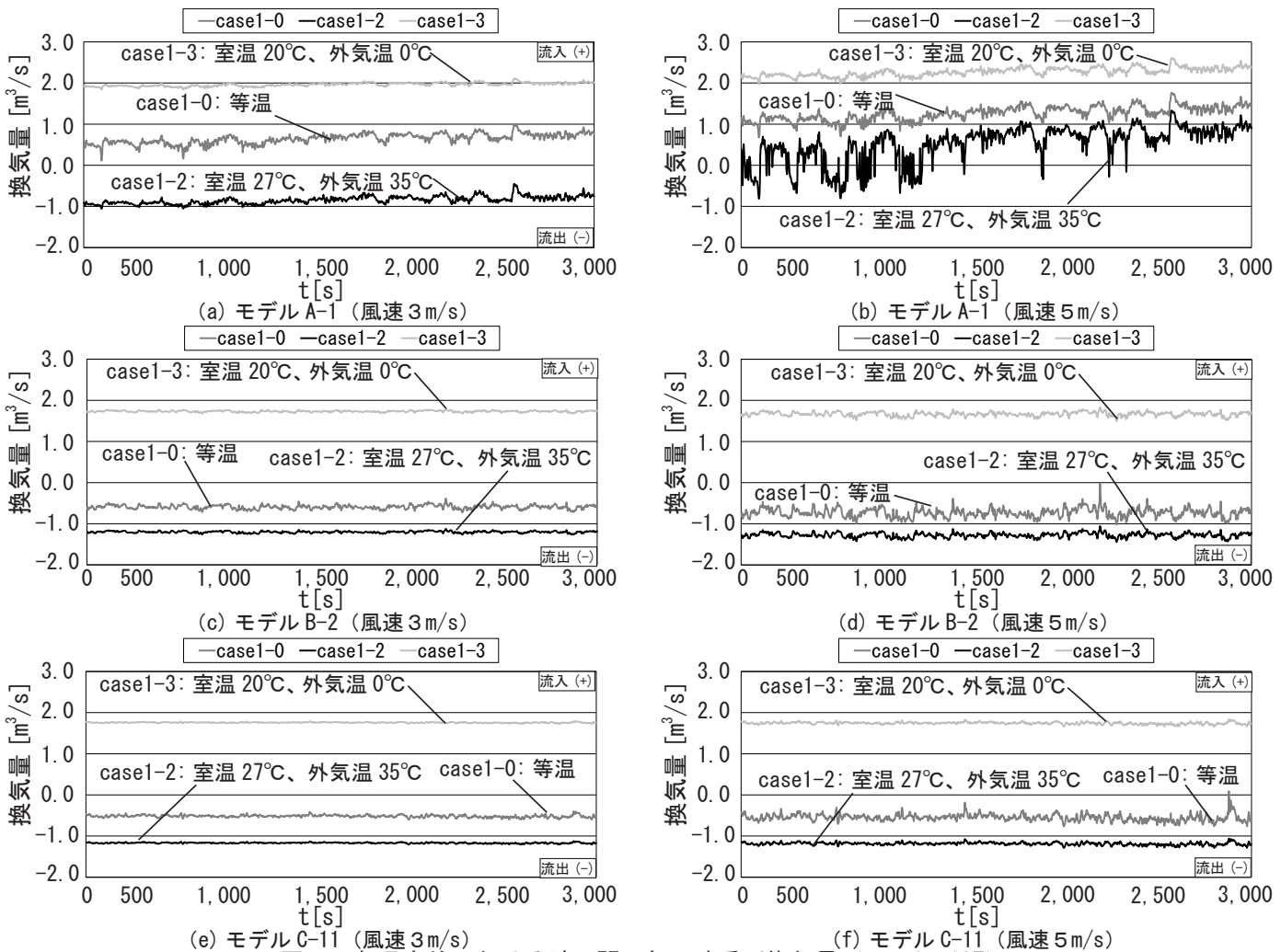


図4 各温度差における壁面開口部の時系列換気量 (case1、13F)

力差が逆向きとなるため、case1-0(室温 20[°C]、外気温 20[°C]、等温)と比較して換気量が減少し、一部の時間では縦シャフトから室への流入が生じる。

(2) モデル B-2(二棟、図 4(c, d)): どちらの風速でも、等温時では常に壁面の開口部から流出する。case1-3(室温 20[°C]、外気温 0[°C])では温度差による圧力差により常に壁面開口部から流入する換気性状となる。

(3) モデル C-11(4×4棟、図 4(e, f)): 換気量の傾向はモデル B と概ね同様である。今回設定した外部風速では周囲に同程度高さの建物がある場合は室内外温度差による圧力差が支配的となる傾向がある。

3.2 外部風と室内外温度差による圧力差が逆向きに生じた場合の換気性状: 図 5 に各階の平均圧力差と壁面開口部の換気量(モデル A-1、case1-2: 室温 27[°C]、外気温 35[°C])を示す。外部風による圧力差と室内外温度差による圧力差が逆向きに生じた場合、合計した平均圧力差がほぼ 0 となる階が生じる(図 5(a))。合計した平均圧力差がほぼ 0 の場合、風圧変動によって壁面開口部から気流の流入出が生じる換気性状となるため、平均換気量に対して変動を考慮した換気量が増加する傾向がある(図 5(b): 風速 3[m/s]・18~20 階、(c): 風速 5[m/s]・6~12 階)。

3.3 風圧変動と室内外温度差による換気量の比較: 図 6 に風圧変動と室内外温度差による壁面開口部の換気量を示す。モデル A-1(図 6(a))では、case1-2(室温 27[°C]、外気温 35[°C])で平均換気量が負の値となり、case1-0(室温 20[°C]、外気温 20[°C]、等温)に対して逆方向の換気が生じる。これは case1-0 に対し、case1-2 で室内外温度差による圧力差が外部風による圧力差を上

回り、縦シャフトから室に気流が流入し壁面開口部から流出する気流性状となるためである。風速が 5.0[m/s]以上では外部風による圧力差が室内外温度差による圧力差を常に超過するため、流入出方向の変化はほぼない。

モデル B-2(図 6(b))及び C-11(図 6(c))では、等温時と比較して、case1-1(室温 25[°C]、外気温 15[°C])、case1-3(室温 20[°C]、外気温 0[°C])では逆向きの換気が生じる。特にモデル B-2 の case1-1 では、外部風速 10.0[m/s]で平均換気量はほぼ 0 であるが、風圧変動によって平均値に対して最大で±30 倍以上の換気量が瞬時的に生じる。

3.4 変動係数: 各階に生じる外部風による圧力差の変動の指標として、変動係数(F)を導入する。変動係数は壁面開口部と屋上開口部の風圧係数差の標準偏差を平均風圧係数差で除して求める。平均風圧係数差は各階開口部と屋上面開口部の風圧係数差から算出する。変動係数の計算式を(1)式に示す。

$$F(\text{変動係数}) = \frac{\sigma}{|\Delta C|} \dots (1)$$

σ : 風圧係数の標準偏差 [-]

ΔC : 開口部の平均風圧係数差 [-]

図 7 にモデル A-1、B-2、C-11 における壁面開口部と屋上開口部の風圧係数差の時間変化と変動係数(case1、13 階)を示す。モデル C-11 の変動係数は 1.257 で 3 case の中で最大、モデル A-1 の変動係数は 0.22 で最小である。モデル B-2 の変動係数は 0.496 である。風圧係数差の時間変化と比較すると平均風圧係数差に対して変動が大きい case では変動係数が大きく、変動が小さい case では、変動係数は小さい。

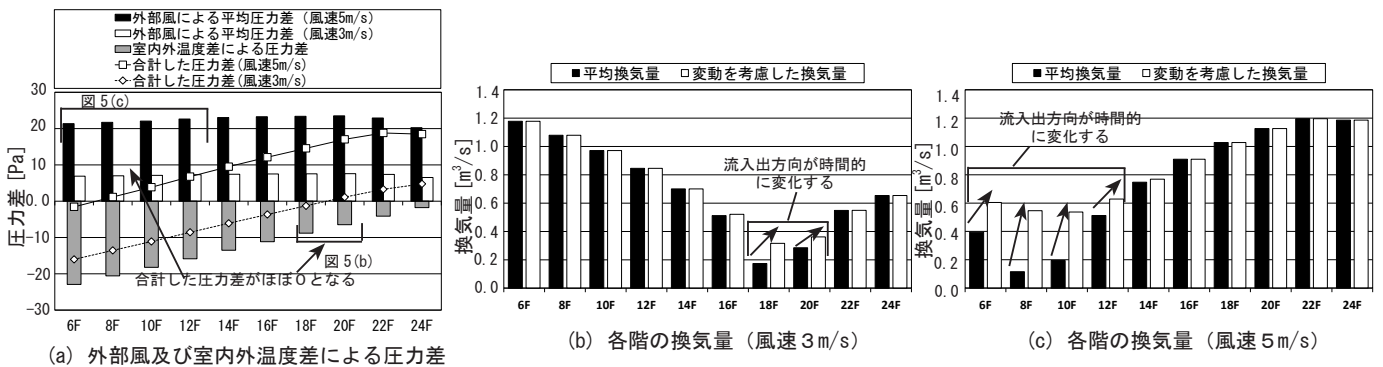


図 5 各階の圧力差と壁面開口部の換気量(モデル A-1、case1-2: 室温 27°C、外気温 35°C)

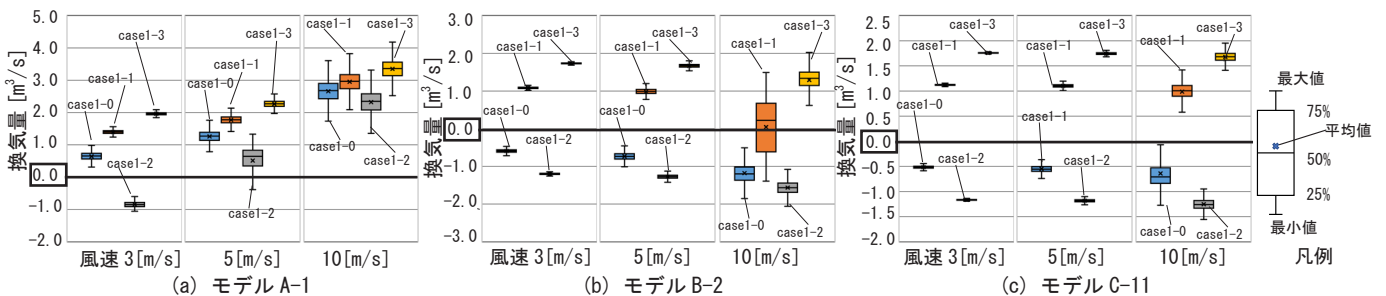


図 6 風圧変動と室内外温度差による壁面開口部の換気量(case1、13F)

3.5 室内外温度差による圧力差と外部風による圧力差の比：外部風と室内外温度差による壁面開口部と屋上開口部間の圧力差を各階において算出し、式(2)より圧力差の比を求める。圧力差の比が負の場合は室内外温度差による圧力差と外部風による圧力差が逆向きであることを示す。

$$R \text{ (圧力差の比)} = \frac{2|\rho_1 - \rho_2|gh}{(-)\Delta C \rho_1 v^2} \dots (2)$$

ρ_1 : 室内空気密度 [kg/m³] g : 重力加速度 [m/s²]
 ρ_2 : 室外空気密度 [kg/m³] h : 開口部間高さの差 [m]
 ΔC : 各開口部の平均風圧係数の差 [-] v : 風速 [m/s]

3.6 F (変動係数) 及び R (圧力差の比) と平均圧力差による換気量に対する変動を考慮した換気量の増加率の関係

図8に平均圧力差から算出した換気量に対する変動を考慮した換気量^{*6}の増加率^{*7}とF及びRの関係を示す。図8にはこれまでに計算した全てのモデル、階、開口条件の計算結果をプロットしている。

(1) R (圧力差の比) と増加率の関係 (図8(a)) : Rが-1付近で増加率が高くなる傾向がある。これは外部風と室内外温度差による圧力差が同程度かつ逆向きに生じるため、階に対する気流の流入出方向が時々刻々と変化する換気性状となり、変動を考慮した換気量が増加するためである。Rが-6または2付近ではF (変動係数)

が5以上の場合で、増加率が高くなる傾向がある。
(2) F (変動係数) と増加率の関係 (図8(b)) : 変動係数と増加率を比較するとほとんど相関がない。

4 まとめ

- ① 室内外温度差を考慮した場合、平均圧力差から算出した換気量に対する変動を考慮した換気量の増加率は、外部風による平均圧力差と室内外温度差による圧力差が同程度で逆向きに生じた場合に極めて大きくなる傾向がある。
- ② 周囲に同程度高さの建物がある場合、外部風によって壁面で生じる圧力が小さくなるため、室内外温度差による圧力差の影響が大きい。
- ③ 圧力差の比が-6または2付近では、F (変動係数) による、変動を考慮した換気量の検討が必要な場合があると考えられる。

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 グロス建ぺい率は約38%である。
※3 縦シャフトの各階との開口部は1.0[m](幅)×0.5[m](高さ)、開口の流量係数 α は0.6[-]とする。
※4 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。屋上開口面の流量計数は1.0とする。
※5 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。
※6 瞬時風圧係数により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。
※7 平均圧力差から算出した換気量に対する変動を考慮した換気量の比率とする。
参考文献
文1) 王・赤林・有波「風力による非定常換気に関する研究 その3 単体と複数の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」空調衛生学会学術講演梗概集、2021年
文2) 赤林・有波「自然風による非定常換気に関する研究 その2 縦シャフトを設置した高層建物を対象とした風圧変動による換気性状」空調衛生学会学術講演梗概集、2020年

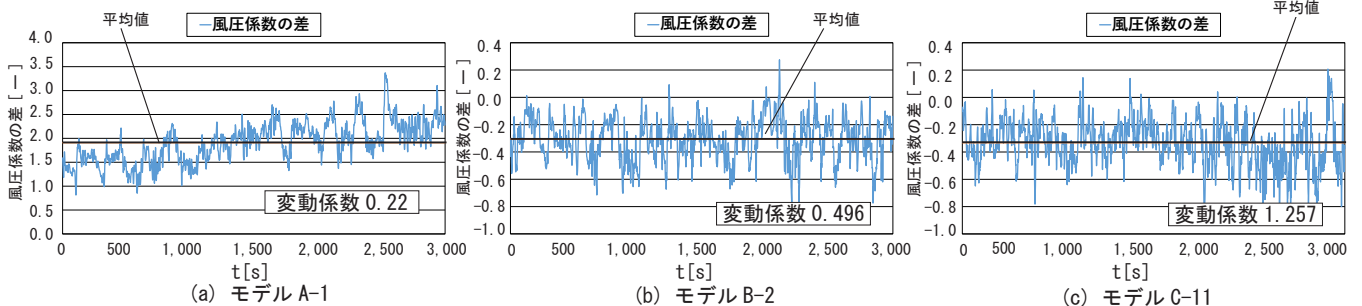


図7 壁面開口部と屋上開口部風圧係数差の時間変化 (case1, 13階)

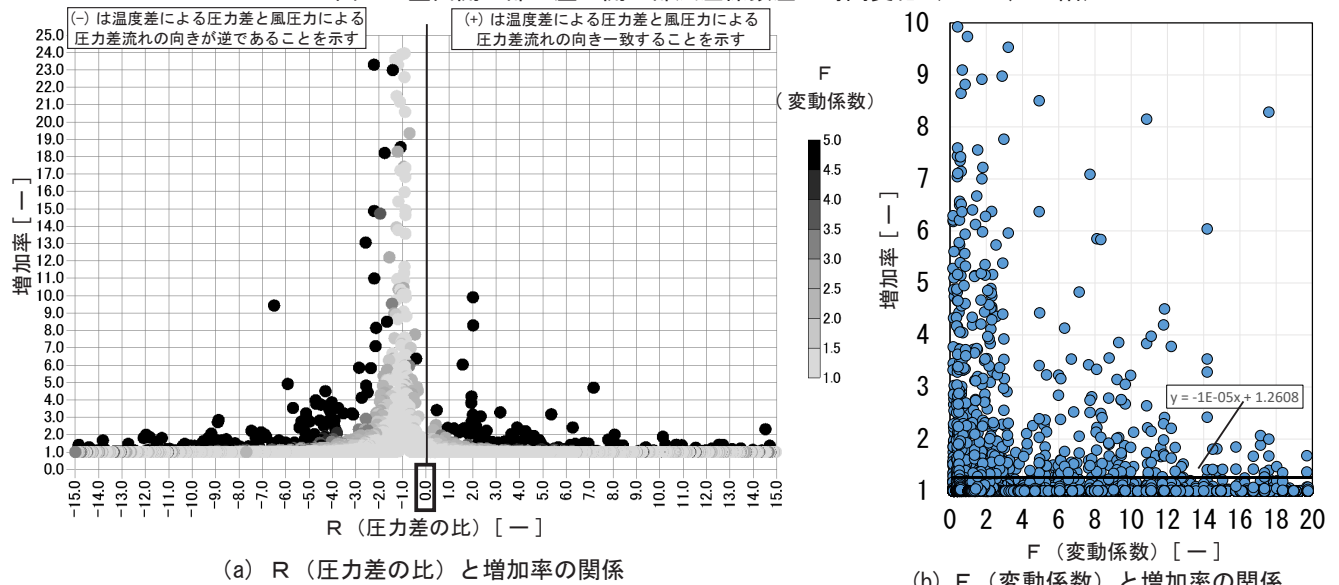


図8 平均圧力差から算出した換気量に対する変動を考慮した換気量の増加率と変動係数 (F) 及び圧力差の比 (R) の関係