

自然換気制御のための建物屋上近傍気流のモニタリング手法に関する研究 (その2) LESによる風向変動特性の基礎的評価

正会員 ○明石 大^{*1} 同 小林 知広^{*2}
同 山中 俊夫^{*3} 同 佐藤 可奈^{*4}

4. 環境工学-13. 空気流動応用-c. 建物周辺気流・都市気流 屋上近傍気流, 風向風速, CFD解析, LES

1. はじめに

構造物屋上近傍では、風上側隅角部による剥離流や逆流の影響を受け、非定常性の高い気流場が形成される¹⁾。そのため、建物屋上に風向風速計を設置して外部風向や風速を測定する際に、外部風の正しい値が測定されているか不明であり適切な風向風速計の設置位置に関するガイドラインも無い。

本研究では、建物屋上近傍気流の水平断面に着目し、測定点での風向・風速と外部風向・風速との差を風洞実験及びCFD解析により評価し、高度な自然換気制御へと繋げることを目的とする。本報では、CFD解析の乱流モデルにLarge Eddy Simulation(以下LES)を用い、前報²⁾で報告したPIVによる実験結果とCFD解析結果を比較し、解析精度の検証及び風速と風向の外部風との差の解析結果を示す。

2. CFDで再現する風洞実験の概要

本報では、前報²⁾で行った風洞実験の結果を用いて解析結果との比較を行う。図1に風洞実験の際の風洞断面図を示す。風洞内はラフネスと格子を模型の風上側に設置し、1/4.8乗のべき乗則に従う設置境界層を再現した。アプローチフロー風速は床上1,000mmに設置したピトー管で測定し、10m/sとなるように設定した。風速分布及び詳細な実験概要は前報²⁾を参照されたい。対象建物模型を図2に

示す。建物高さH=200mmの1:1:2単体建物(以下Case1M)と建物高さH=400mmの1:1:4単体建物(以下Case1H)の2条件で、各建物条件で屋上に塔屋が無い条件(P0)と屋上中央部に塔屋(25mm角の立方体)がある条件(P1)の計4条件の模型を対象とした。

3. CFD解析概要

前述の建物模型4条件を対象に、風洞実験を概ね再現したCFD解析を行った。図3に解析領域及びメッシュレイアウトを示す。解析領域はX=2,300mm, Y=1,000mm, Z=1,400mmとした。建物模型は図3に示す位置に設置し、塔屋がない条件では建物幅を20分割した。表1に解析概要を示す。屋上近傍気流は剥離の影響により、高い非定常性を有するため解析精度の向上を期待し、乱流モデルには非定常計算モデルであるLESを用いた。SGS渦

表1 LES解析概要

CFD Code	Fluent 19.2	
Turbulence Model	Large Eddy Simulation (Smagorinsky-Lilly Model : $C_s=0.1$)	
Algorithm	SIMPLE	
Time Step	0.0005 sec. (2 kHz)	
Pre-conditioning Term	2,000 time steps (1 sec.)	
Total Calculation Time	22,000 time steps (11 sec.)	
Boundary Condition	Inlet	Profile (Experimental Value)
	Outlet	Gauge Pressure : 0 [Pa]
	Walls	Two Layer Model of Linear-Log Law
Total Number of Cells	Case1M_P0	1,353,980
	Case1H_P0	1,609,000
	Case1M_P1	2,398,560
	Case1H_P1	2,678,962

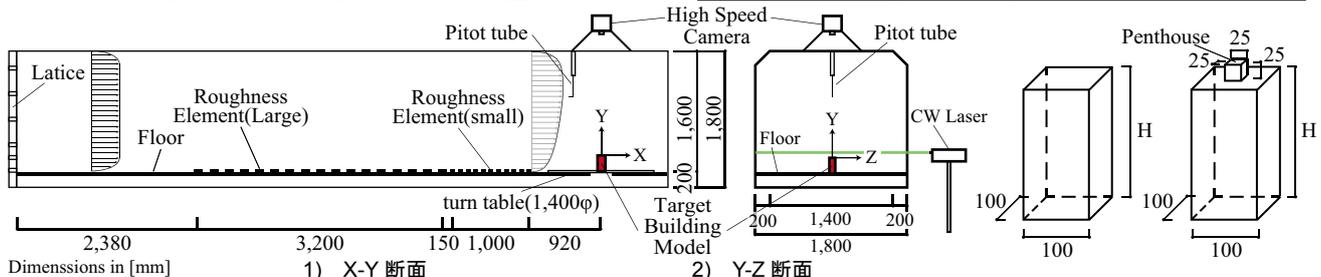


図1 風洞実験概要

図2 実験模型

Monitoring Method of External wind velocity around Building Roof Top for Natural Ventilation Control
(Part 2) Numerical Investigation of Velocity Fluctuation for Basic Configuration using LES

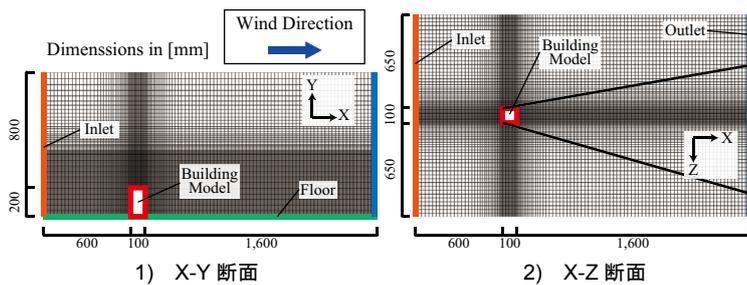


図3 メッシュレイアウト (Case1M_P0条件)

粘性モデルには Smagorinsky-Lilly モデルを用い、Smagorinsky 定数は 0.1 とした。標準 k-εモデルの計算結果を初期条件とし、時間刻みは 0.0005 sec. (2.0 kHz) として、22,000 time step の計算を行い、初期条件から 2,000 time step (1.0 sec.) の助走計算の後、20,000 time steps (10.0 sec.) の本計算を行った。流入境界条件として、既往の研究³⁾で同じ風洞内環境下において測定されたアプローチフローの風速、乱流エネルギー、乱流散逸率を高さごとに与え、Smirnov ら⁴⁾の手法に基づき瞬時風速を与えた。アプローチフローの風速比及び乱流強度の鉛直分布を図4に示す。図5に建物屋上平面の座標の取り方及び3.3節で用いるモニター点の平面位置を示す。主流方向に X 座標を取り、建物屋上中心点を原点として以降の結果を示す。

4. 解析結果

4.1 CFD 解析精度検証

CFD 解析精度の検証を行うために、風洞で行った PIV 解析結果との比較を行う。Case1M_P0 の模型を対象に、図6に示すように模型中央断面 (Z=0 mm) の3列で平均合成風速の結果で比較を行った。横軸は、10 m/s で無次元化した風速比である。PIV の結果が単調に増加しているのに対し、LES の結果は剥離高さで急激に風速が増加していることから、

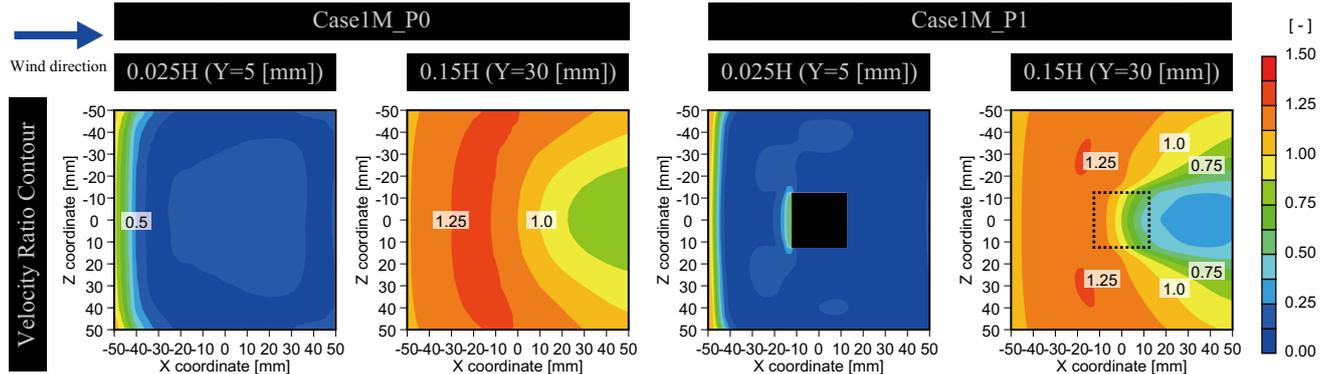


図7 水平断面における平均風速コンター図 (Case1M)

図5 モニター点の平面配置

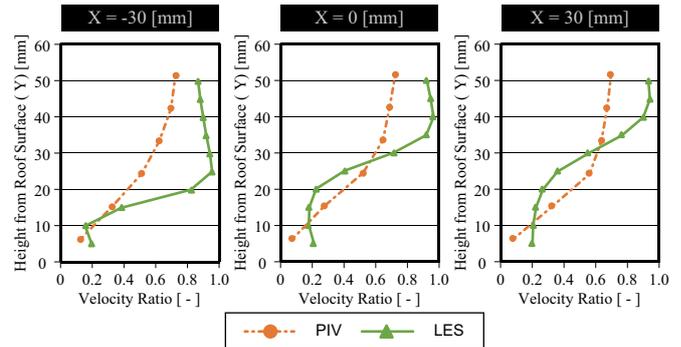


図4 流入境界条件

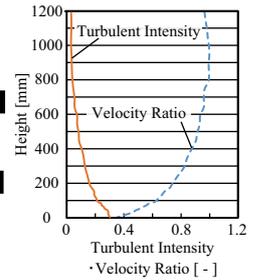


図6 PIV 実験と LES の比較

LES では剥離流を再現していると考えられ、今回行った風洞での PIV では、大きな速度勾配を適切に測定できていない可能性がある。

4.2 建物屋上水平断面気流場の把握

図7に Case1M の建物上部における水平断面の平均風速を軒高風速で基準化した無次元風速分布を示す。0.025H の高さでは、大半の位置で基準風速の値と離れた値を示し、風上側のごく一部でしか計測ができないことがわかる。一方、0.15H の面では剥離により 1.25 程度になる領域もあるが、1.0 程度になる領域も見られる。塔屋の影響として、0.15H で塔屋による剥離の影響で P0 より風速が低くなる位置が見られる。

4.3 外部風向と測定風向の風向差

各点における瞬時の風向が、外部風向とどの程度一致するかを把握するため、モニター点での風向と外部風向の差の確率密度分布及びそれから算出さ

れる確率によって、風向の測定精度を評価する。検討を行うラインの詳細を図5に示す。P1条件ではLine C (模型中央)は塔屋上部の結果を、Line BとLine Dでは塔屋の高さまで検討を行い、Line E及びP0のLine BとLine Dの結果は省略した。以降に示す確率密度分布のグラフは、縦軸が確率密度、横軸は外部風向との風向差である。この風向差は -180° から 180° の範囲で、モニター点での測定風向が外部風と一致する際は差は 0° 、外部風に対して時計回りの風向を示す際は、正の値を示すものとする。

図8に各建物条件における、各測定ラインでの風向差の確率密度分布を示す。Line A, C, Fについては、全体的な傾向として、高くなるにつれ 0° の位

置に山が寄り、かつ高くなることがわかる。また、模型条件による傾向の違いはあまり見られなかった。測定ラインごとの傾向として、Line Cの5mmと10mmの高さでは、 $\pm 180^\circ$ の位置で低い山がみられることから逆流が生じていることがわかる。また、 $0.05H$ までの高さでは、Line Cでは 0° 付近に山は見られないが、Line Aでは負の値に、Line Fでは 0° の位置に山が見られる。Line Aは風上側側面隅角部での剥離、Line Fは風上側隅角部による剥離の影響を受けるためと考えられる。屋上から近い位置でも、Line C, Fの位置では精度の良い風向を測定できることが期待できる。

P1条件のLine C(塔屋上中央列)では、両建物条

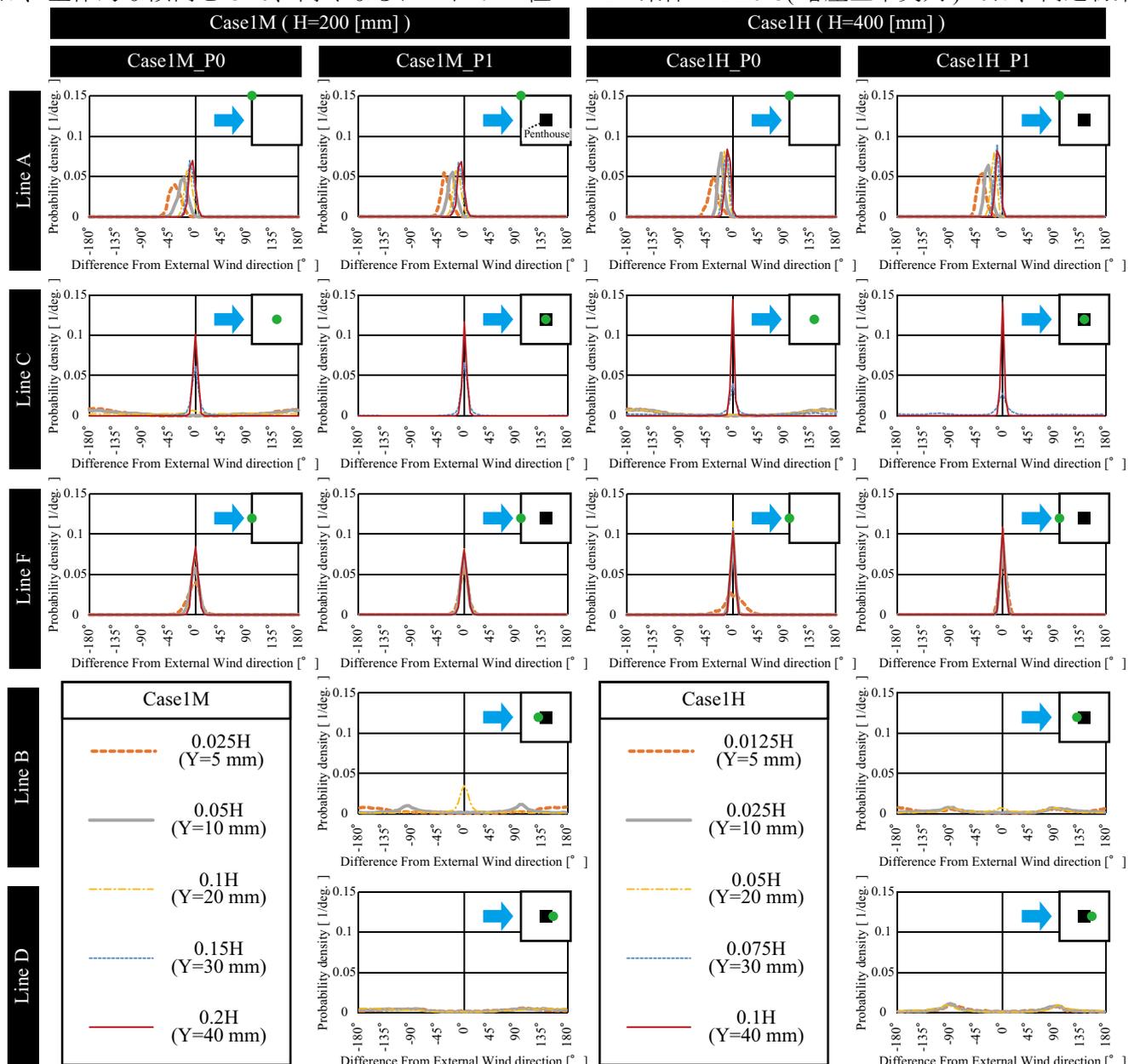


図8 外部風向とモニター風向の差の確率密度分布

表 2 風向差が±5°及び±10°に属する確率 (Case1M) [%]

Case1M_P0 (H=200[mm])								
	Line A		Line C		Line E		Line F	
	±5°	±10°	±5°	±10°	±5°	±10°	±5°	±10°
0.025H (Y=5 mm)	0.1	0.3	0.3	0.5	4.8	9.7	39.4	67.4
0.05H (Y=10 mm)	1.0	6.7	0.5	1.1	5.8	11.6	54.6	85.1
0.1H (Y=20 mm)	13.7	36.8	6.1	11.6	22.1	41.8	68.4	96.5
0.15H (Y=30 mm)	27.0	62.4	51.9	75.0	45.2	74.3	72.9	98.2
0.2H (Y=40 mm)	38.4	77.3	85.1	99.3	65.8	91.8	73.8	96.9

Case1M_P1 (H=200[mm])												
	Line A		Line B		Line C		Line D		Line E		Line F	
	±5°	±10°	±5°	±10°	±5°	±10°	±5°	±10°	±5°	±10°	±5°	±10°
0.025H (Y=5 mm)	0.0	0.2	0.2	0.6			1.5	3.0	3.8	7.4	55.3	84.1
0.05H (Y=10 mm)	1.1	6.4	1.1	2.4			0.8	1.6	6.7	13.5	68.5	93.5
0.1H (Y=20 mm)	12.2	35.2	33.4	53.3			0.5	1.2	19.0	35.8	73.5	96.4
0.15H (Y=30 mm)	25.6	59.1			57.0	77.7			47.0	71.5	73.1	97.3
0.2H (Y=40 mm)	36.2	77.5			86.9	99.5			70.9	94.8	74.1	96.3

件とも P0 条件と差が見られない。両条件とも建物による剥離と塔屋による剥離の高さが一致し、塔屋が剥離流に影響を与えなかったためと考えられる。

塔屋の影響を考察するため、P1 条件のみで塔屋横風上側 (Line B) と塔屋横風下側 (Line D) で 20 mm の高さまでで考察を行った。0°の位置に山が見られるのは、Case1M_P1 の Line B の 20 mm の高さのみで、Case1M_P1 の Line D ではどの高さでも様々な風向が測定され山は無かった。一方、Case1H_P1 の Line D ではどの高さでも、±90°の位置に山が見られ、Line B で両模型条件とも 10 mm の高さで見られた。それぞれ気流が塔屋に衝突し、横方向に逃げる気流が発生するためと考えられる。

次に、Case1M において、確率密度分布を積分することにより風向差が±5°以内及び±10°以内となる確率を算出し、各地点での風向測定精度を表 2 に示す。20%以下となる結果は青色で、80%以上には橙色で色付けをした。両条件とも Line F 以外では、20 mm の高さまでは測定精度が低く 40 mm の高さで初めて高精度となるが、Line F では P0 では Y=10 mm 以上、P1 では Y=5 mm の高さから、風向差が±10°内に高確率で入るため、低位置での風向測定を行う際は、Line F が精度が良いことがわかる。また、誤差が±5°以内のより精度の高い計測を目的とする際は、Y=40 mm の高さでの Line C が最も高確率で

あるが、それ以下では Line F が適切であると考えられる。塔屋による影響としては、Line F の 0.05H の高さまでで、P1 の方が精度が高くなっている。

5. まとめ

本報では、単体建物を対象に屋上近傍水平断面の気流性状を PIV により把握した結果と LES による解析結果で比較を行い、LES により風速分布及び外部風向と測定風向の差を評価した。屋上面に近い位置程風向の測定精度は低く、風上側中心点では低位置でも風向の測定精度は高いことが分かった。今後は、アプローチフローの風向や建物形状を変更した際の分析を行う所存である。

【謝辞】

本研究の一部は JSPS 科研費 (若手研究 A, 課題番号 JP16H06110, 研究代表者: 小林知広) の助成を受けた。

【参考文献】

- 1) 西村宏昭, 谷池義人: 二次元正方形角柱の変動風圧特性, 日本建築学会構造系論文集, No.533, pp37-43, 2000.7.
- 2) 佐藤, 小林, 山中ら: 自然換気制御のための建物屋上近傍気流のモニタリング手法に関する研究 (その 1) 風洞実験による PIV を用いた風向変動特性の評価, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 2020 年 6 月掲載予定
- 3) 福山, 山中ら: 高密度街区における建物の通風設計に関する研究 (その 1) 風洞実験による壁面風圧及び建物間風速分布, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A-30, 2019.3
- 4) A. Smirnov, S. Shi, I. Celik: Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.123, Issue2, pp359-371, 2001.6

※1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 博士前期課程
 ※2 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 准教授・博士 (工学)
 ※3 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授・博士 (工学)
 ※4 大阪大学工学部地球総合工学科 学部生

Graduate Student, Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University
 Associate Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.
 Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr. Eng.
 Undergraduate Student, Division of Global Architecture, School of Engineering, Osaka University