

LES によるインナーバルコニーおよび隅切りを有する

高層建築物に作用する風圧予測

Wind Pressure Prediction for High-rise Building with Inner Balcony and Corner Cut by Large-Eddy Simulation

- 挾間 貴雅 1, 鹿島技研, 東京都調布市飛田給 2-19-1, E-mail: takamasa@kajima.com
- 伊藤 嘉晃 2, 鹿島技研, 東京都調布市飛田給 2-19-1, E-mail: itohyoshiaki@kajima.com
- 近藤 宏二 3, 鹿島技研, 東京都調布市飛田給 2-19-1, E-mail: kondokoj@kajima.com
- 山本 学 4, 鹿島技研, 東京都調布市飛田給 2-19-1, E-mail: yamamoto-ma@kajima.com
- 田村 哲郎 5, 東工大, 神奈川県横浜市緑区長津田 4259, E-mail: tamura@depe.titech.ac.jp
- 横川 三津夫 6, 神戸大, 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: yokokawa@port.kobe-u.ac.jp
- Takamasa HASAMA 1, Kajima Technical Research Institute, 2-19-1, Tobitakyu, Chofu-Shi, Tokyo
- Yoshiaki ITOH 2, Kajima Technical Research Institute, 2-19-1, Tobitakyu, Chofu-Shi, Tokyo
- Koji KONDO 3, Kajima Technical Research Institute, 2-19-1, Tobitakyu, Chofu-Shi, Tokyo
- Manabu YAMAMOTO 4, Kajima Technical Research Institute, 2-19-1, Tobitakyu, Chofu-Shi, Tokyo
- Tetsuro TAMURA 5, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama
- Mitsuo YOKOKAWA 6, Kobe University, 1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe

To evaluate the prediction accuracy of wind pressure on the high-rise building in urban area using Large-Eddy Simulation (LES), the LES calculation and the wind tunnel experiments were compared for the high-rise building with complex surface shape consisted by inner balcony and corner cut. As the result of the complex surface shape resolution, the complex flow feature inside the balcony and around the outer frame was simulated, and the complex vortex shedding including the subtle vortex structure caused by the shape of the inner balcony was captured. For the comparison of the external pressure coefficient of mean, standard deviation, maximum peak and minimum peak value, LES and the wind tunnel experiments were good correspondence, except for the upwind corner cut region. For the power spectrum, the mean and standard deviation of overturning moment coefficient and twist moment coefficient, the LES calculation were consistent with the wind tunnel experiments.

1. はじめに

近年の計算機の発達に伴い、高精度な数値流体力学 (CFD) 解析手法の一つである Large-Eddy Simulation (LES) を用いた建築物の外装材や構造骨組の風荷重評価が実用化されつつあり、計算格子性状や街区の影響を再現するために求められる周辺市街地の再現方法など、精度良く壁面風圧を再現する計算条件について明らかになりつつある。例えば、岸田ら⁽¹⁾や田中ら⁽²⁾は、街区に存在する高層建築物の風圧評価に LES を適用し、風洞実験との良好な対応を得ている。小野ら⁽³⁾は、アスペクト比の大きい 3 次元角柱を対象とした LES により風圧変動性状を特徴づける流れ場の構造を明らかにしている。挾間らは、中層街区の有無および対象建築物の有無を考慮した LES を実施し、風圧評価に際して街区が評価対象の建築物に与える影響を明らかにしている⁽⁴⁾。また、日本建築学会では、これらの知見を纏め、CFD による風荷重評価のためのガイドラインの刊行を予定している⁽⁵⁾。しかしながら、対象建築物形状が風圧の予測精度に及ぼす影響についての検討が十分とは言えない。建築物から剥離する風の流れに対して建築物表面付加物が与える影響が大きいことは実験的に知られており⁽⁶⁾、また、建築物壁面の局部負圧を再現するにあたり対象建築物近傍の LES 格子解像度が重要なパラメーターになることが指摘されている⁽⁷⁾。しかしながら、バルコニーや手摺などの建築物表面付加物がある高層建築物を対象とした計算事例は計算負荷が大きいためにほとんど無く、建築物表面付加物により影響を受けた建築物全体に作用する風力の予測や表面付加物自体に作用する風圧の予測に必要な計算条件が体系的に明らかになっていない。したがって、本研究では、実在街区中の複雑表面形状を有する超高層建築物の風圧

実験⁽⁸⁾を比較対象とし、高い計算格子解像度により大規模計算資源が必要とされる故にこれまで殆ど実施例が無い、隅切りおよびインナーバルコニーなどの凹凸を有する高層建築物の LES による風圧予測性能を評価した。対象となる超高層建築物近傍の流れ性状や渦構造の再現性に注目しながら、格子解像度などの LES 計算条件を適切に設定し、風圧および風力を精度良く予測できるようになることを最終的な狙いとして、まずは風洞実験との比較を通して LES の風圧予測精度を検証した結果について報告する。

2. 計算対象および計算条件

計算対象は、隅角部に隅切りやバルコニーを有する超高層集合住宅と、種々の建築物や鉄道高架橋などを有する対象建築物を中心とした半径 280m の実在街区から構成され、特徴としては対象建築物の近くに 2 棟の超高層建築物が隣接している状況である。本問題が適切な精度で予測できれば、実務対象とする多くの案件を今後取り扱うことができると考える。計算対象を図 1 に示す。評価対象は、街区中に建つ高さ(H)200m、見附幅(B)37m、アスペクト比(H/B) 5.4 の建築物で、隅切りおよびインナーバルコニーを有する。B で無次元化した計算領域は、34.8(x)×30.9(y)×21.6(z)である。風洞実験は既往の結果を利用した⁽⁸⁾。LES コードには OpenFOAM-2.2.19)を利用し、標準 Smagorinsky モデル⁽¹⁰⁾ ($C_s=0.12$) と共に使用した。図 2 に対象建築物の表面近傍計算格子形状を、図 3 にインナーバルコニー近傍の計算格子性状を示す。計算メッシュには $\Delta x/B=\Delta y/B=0.19$ を基準とした 6 段階ネスティング (約 1 億 4000 万要素) を適用し、対象建築物の見附幅を 225 分割 ($\Delta B=0.003$, 実スケール換算で約 13cm, 図 2・図 3 の Level 6 の

領域) して隅切りおよびバルコニー周りを解像している。流入境界条件として、図 4 に流入境界における平均風速および乱流強度プロファイルを示す。流入変動風は、地表面粗度区分Ⅲの気流を対象に、模擬変動風と準周期境界条件を有するドライバ部にて生成した⁽⁴⁰⁾。対象建築物の頂部高さにおける流入境界風速 U_{in} を用いたレイノルズ数は $U_{in} \cdot B / \nu = 65000$ である。時間進行法は 2 次精度後退、移流項には中心差分を基本とした流束制限関数による最大 20% 風上差分、粘性項には 2 次精度中心差分を使用した。天井面および側壁面は Free-slip 条件を、床面および壁面には Spalding 則を適用している。LES の積分時間は実スケール 10 分相当 (再現期間 50 年: 建築物頂部での設計風速で 49.3m/s) とした。

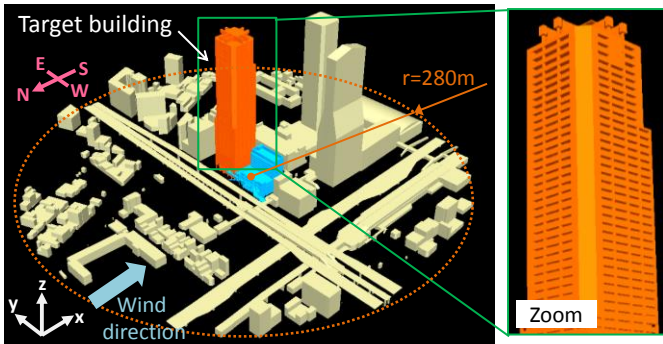


Fig. 1 Calculation target.

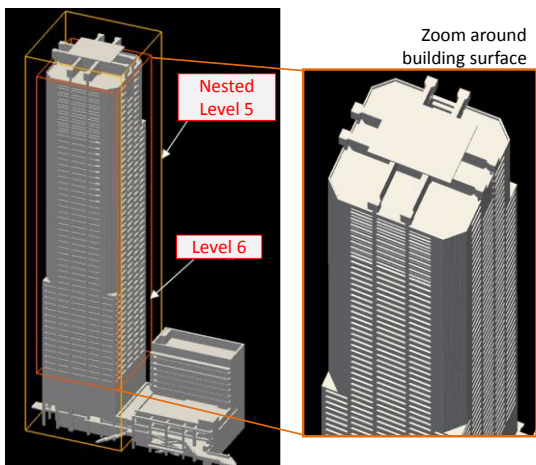


Fig. 2 Calculation mesh shape on surface of target building.

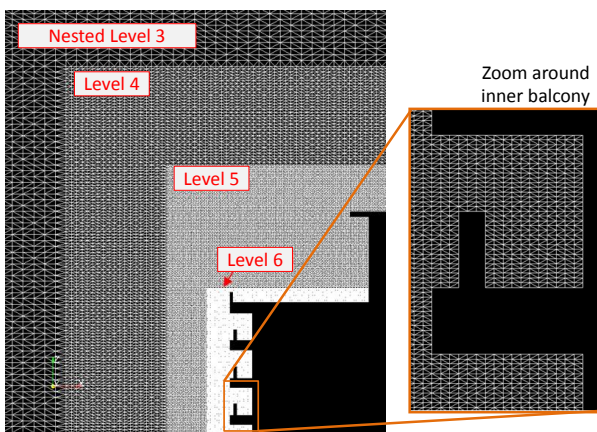


Fig. 3 Calculation mesh shape of vicinity of inner balcony.

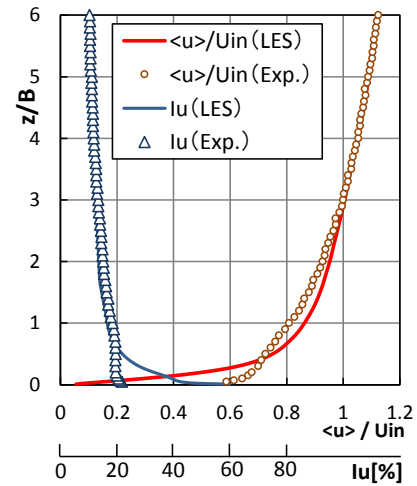


Fig. 4 Vertical profile of stream wise velocity and turbulent intensity at inflow boundary.

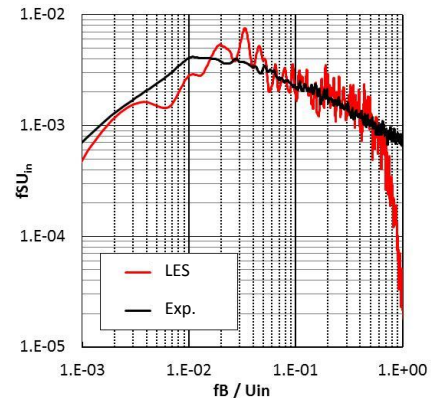


Fig. 5 Power spectrum density of stream-wise velocity component at inflow boundary.

3. 計算結果

(1) 対象建築物表面近傍の流れ

はじめに、流れ場の可視化に基づき、風速場と壁面圧力の傾向について簡単に考察する。図 6 に主流方向風速の瞬間値の分布を示す。京コンピュータを利用しての大規模計算格子の適用により、これまで難しかった対象建築物表面の数十センチオーダーの凹凸を解像することが可能となり、その結果、バルコニー内部やアウトターフレーム周りの複雑な流れが表現されていることが分かる。このときの外圧係数の平均値、標準偏差、最大ピーク値、最小ピーク

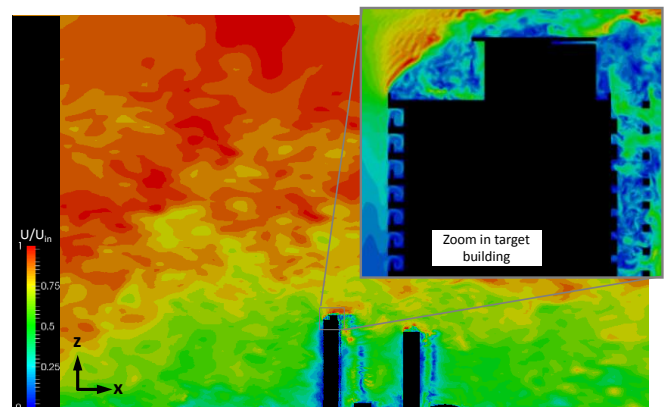


Fig. 6 Contour of instantaneous velocity on plane of target building center.

ク値を図7に示す。インナーバルコニーを有するため、風上壁面の風圧分布が直方体形状の建築物に比べて、同一高さにおける幅方向の風圧分布が均一になる傾向が確認される。また、隅切りが有る階と無い階で側壁面の圧力分布の傾向が異なっており、隅切りの影響が再現されている。図8に、圧力 $p/U_{in}^2 = -0.2$ の圧力等値面コンターを示す。インナーバルコニーの形状が再現されているため、同スケールに起因する微細な渦構造を内包する逆円錐渦の放出が再現されている。

(2) 外圧係数の風洞実験結果との比較

図9に各種外圧係数の LES と実験との比較を示す。多くの計測点で、実務適用に供する上での判断基準である中央値の±20%以内に収まっており、両者の対応は概ね良好であるが、図9のA・B・C・Dで示すように一部で相違が生じている。これは後に示す「隅切り」「剥離点近傍」「低層部隣接建物側壁面」で生じている。

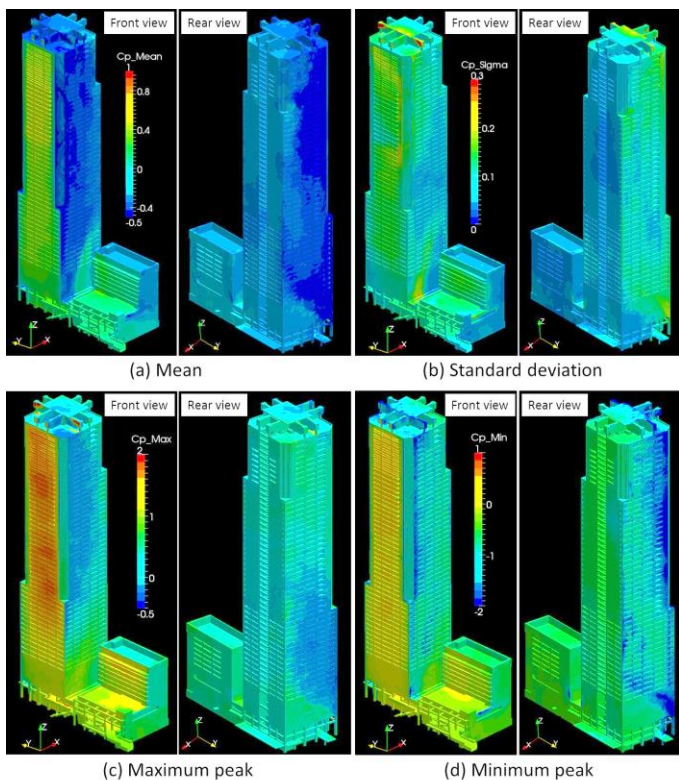


Fig. 7 Contour of each pressure coefficient on target building.

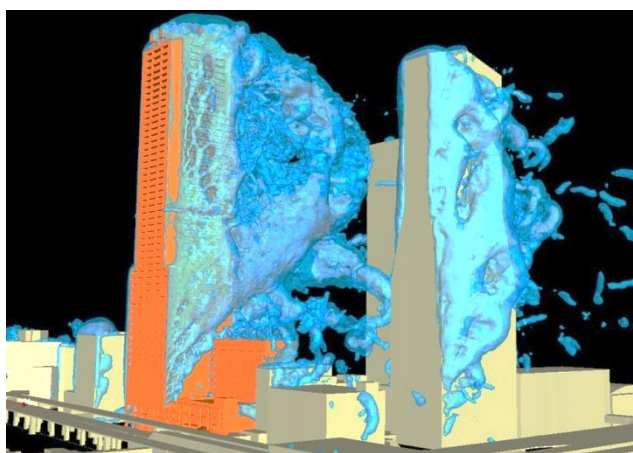


Fig. 8 Iso-surface of instantaneous pressure around target building.

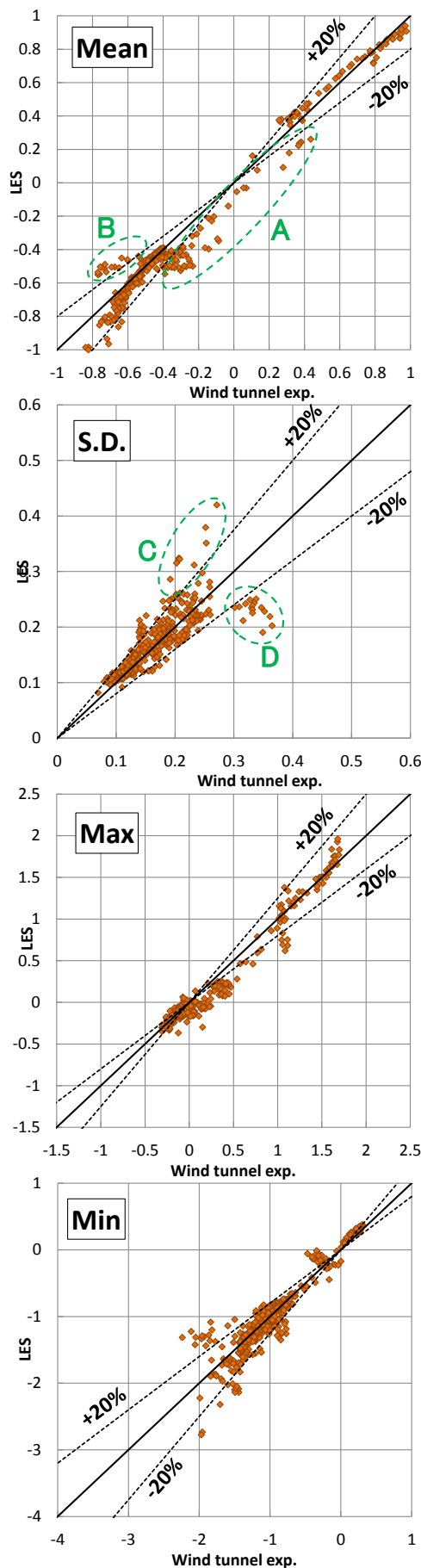


Fig. 9 Comparison of each wind pressure coefficient.

図 10 に計測点を、図 11 に高さ $z/B=1.8$ における外圧係数を示す。LES と実験は概ね一致する傾向にあるが、側面 W において平均値、標準偏差、最大値に、背面 S の一部において標準偏差および最小値に、前面 N の端部において平均値、標準偏差、最大値に僅かな差異が生じている。平均値、標準偏差の差異は、図 9 に示す A および D に該当する。側面 W 側計測点の差異の原因として、隣接建築物の計算格子解像度の不足 (高さ $z/B=1.1$, 4 段ネスティング: $\Delta/B=0.012$) により、対象建築物に影響を及ぼす隣接建築物からの剥離渦の再現性が不足している可能性があり、対象建築物と同等の高解像度格子の適用範囲を拡大する検討の必要がある。

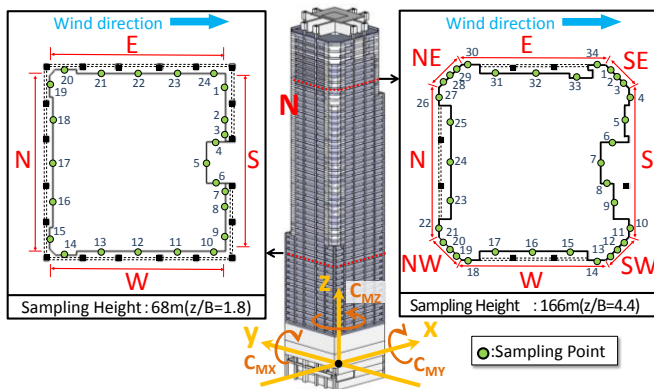


Fig. 10 Part of measurement point and definition of moment coefficient.

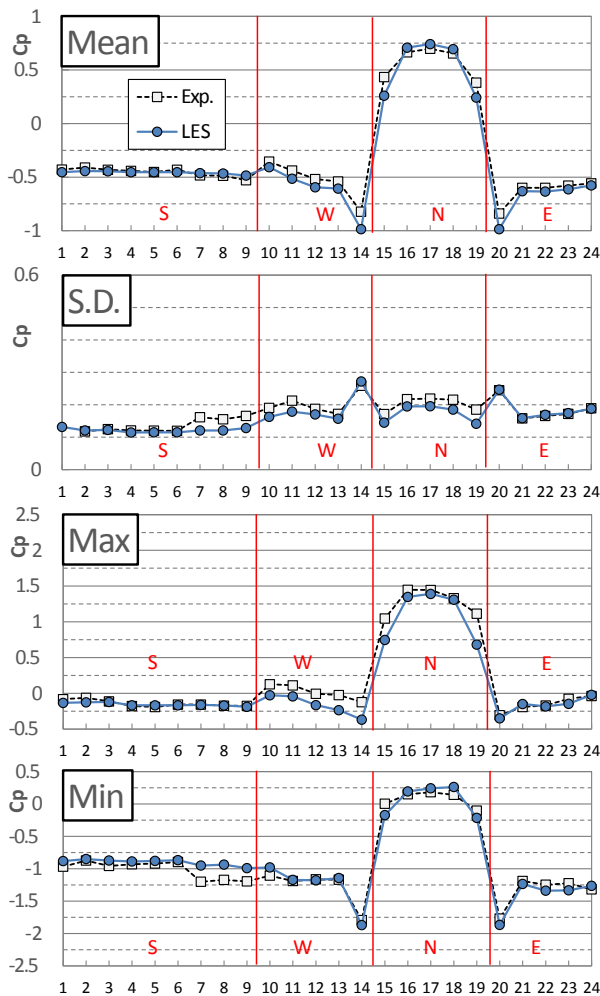


Fig. 11 Distribution of each wind pressure coefficient at $z/B=1.8$.
(Horizontal axis: measurement number)

図 12 に高さ $z/B=4.4$ における外圧係数を示す (計測点は図 10)。平均値は、上流側の隅切り NW および NE, 剥離点近傍である側面 W および E の上流端で相違が生じており、図 9 の A および B に該当する。変動値の差異も同様に分布しており、図 9 の C および D に該当する。本計算では計算時間の短縮のため局所的に 1 以上のクーラン数を許容しており、これらの領域では 3~4 程度のクーラン数となるため、差異は時間解像度不足に起因していると考えられる。最大値の対応は概ね良好であるが、最小値については、隅切りを含む側壁面で相違が生じており、かつ非対称である。これは対象建築物の斜め後方に存在する高層建築物の計算格子解像度不足 (3 段ネスティング: $\Delta/B=0.024$) により、同建築物との衝突流れと対象建築物に形成される後流との相互作用の再現性不足が考えられる。対象建築物からの剥離流れに対して後方の高層建築物が干渉するメカニズムを明らかにした上で、影響を特徴付ける渦スケールを解像できる格子幅を両建築物の間に適切に設置するか、他の Sub-grid scale モデルを検討する必要がある。

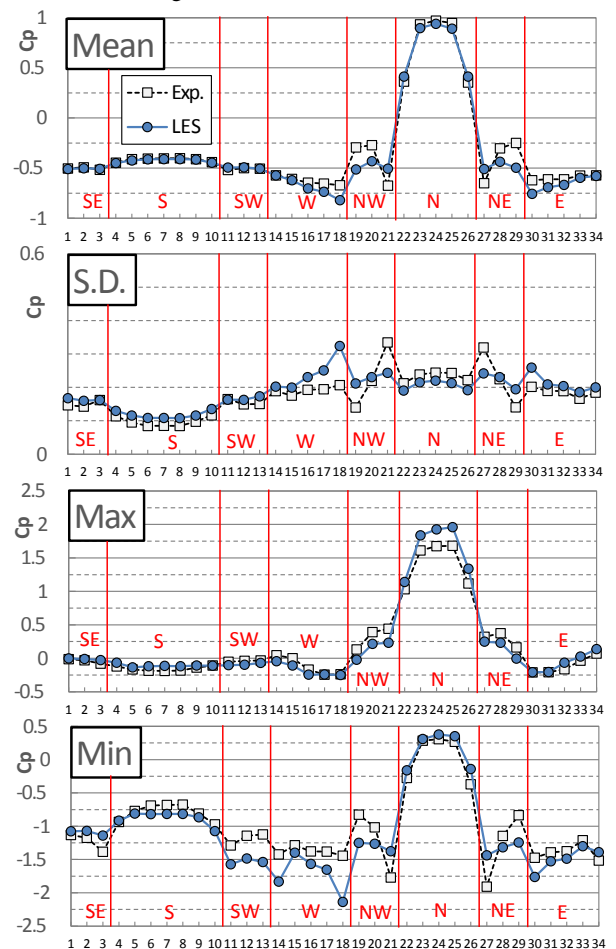


Fig. 12 Distribution of each wind pressure coefficient at $z/B=4.4$.
(Horizontal axis: measurement number)

(3) 各種モーメント係数

図 13 に転倒モーメント係数およびねじれモーメント係数パワースペクトルを示す (係数の定義は図 10)。これらは、風洞実験は 5 分力風力天秤を、LES は対象建築物の全表面格子を用いたモーメント積分値の時刻歴を用いて算出している。各結果において LES は、サンプリング時間が比較的に短いため低周波数域での対応は悪く見えるものの、ピークおよび高周波側の減衰が実験と良く対応している。特に最もパワーが大きい主流直交方向 C_{MY} は、建築物の固有振動数として想定される範囲においてのピークの一致を見せる。表 1 に転倒モーメント係数およびねじれモーメント係数

を示す。平均および標準偏差も実験と良く対応している。なお、主流直交方向成分 (C_{MY}) および鉛直軸方向成分 (C_{MZ}) の平均値の比較では、実験と LES で 2~3 倍の開きが生じているが、これは、周辺建築物の配置および対象建築物の形状により C_{MY} および C_{MZ} は平均的な値が生じにくくゼロに近い値を示すためであり、値が卓越する主流方向成分 (C_{MX}) を基準とすれば、両者は概ね対応していると言える。

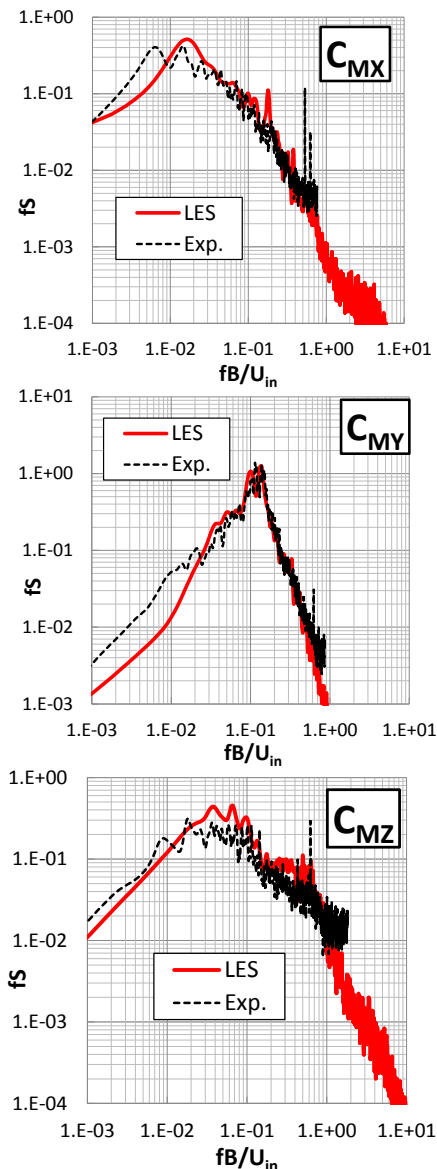


Fig. 13 Each moment coefficient spectrum density.

Table 1 Mean and standard deviation of each moment coefficient.

	C_{MX}		C_{MY}		C_{MZ}	
	Exp.	LES	Exp.	LES	Exp.	LES
Mean	-0.428	-0.412	0.004	0.013	0.010	0.005
S. D.	0.095	0.093	0.090	0.094	0.020	0.016

4. おわりに

街区に建つ複雑表面形状を有する高層建築物を対象に LES を適用し、約 1 億 4 千万要素の計算格子適用により複雑表面形状を解像し、風洞実験結果との対応を明らかにした。

- ・ バルコニー内部やアウトフレーム周りの複雑な流れが表現されていることが確認され、インナーバルコニーの形状に起因する微細な渦構造を内包する逆円錐渦の放出が確認された。

- ・ 壁面の外圧係数は、インナーバルコニーの影響で風上壁面での分布性状が直方体形状の建築物に比べて、同一高さにおける幅方向の風圧分布が均一になる傾向が確認された。
- ・ 隅切りが有る階と無い階で側壁面の圧力分布の傾向が異なっており、隅切りの影響が再現されていることが確認された。
- ・ 外圧係数の予測精度検証について、平均・標準偏差・最大ピーク・最小ピークを対象にした LES と風洞実験の比較では、風上側の隅切り部においては両者の一致が悪化する傾向にあるが、多くの計測点で中央値の±20%に収まっており、両者は概ね一致することを示した。
- ・ 転倒モーメント係数およびねじれモーメント係数パワースペクトルについて、LES と実験は良く対応しており、平均および標準偏差も良く一致することを示した。
- ・ 外装材設計に使用する局所的な風圧評価については、対象建築物の剥離流れと周辺建築物との干渉の再現性に関連した予測精度の改善余地があるものの、転倒モーメント係数等の骨組用風荷重評価に使用する建築物全体に作用する風力評価については実用的な精度で供することが可能と言える。

謝 辞

本研究の成果は、理化学研究所の「京」コンピュータ平成 26 年度産業利用枠「実在街区に建つ複雑表面形状を有する超高層建築物の LES (課題番号:hp140187)」を利用して得られたものである。また、計算コードのチューニングは、一般財団法人高度情報科学技術研究機構の協力を得て実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 岸田岳士, 田村哲郎, 野津剛, 勝村章, 奥田泰雄, 溜正俊, "LES による建築物の風荷重評価の実用化検討-風洞実験結果および観測結果との比較-", 第 22 回風工学シンポジウム, (2012), pp.293-298.
- (2) 田中英之, 大竹和夫, 土屋直也, "LES による高層建築物の風力予測精度に与える周辺市街地の影響", 第 22 回風工学シンポジウム, (2012), pp.365-370.
- (3) 小野佳之, 田村哲郎, "三次元角柱側面に発生する局部負圧に関する LES", 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 694 号, (2013), pp.2065-2072.
- (4) 挾間貴雅, 伊藤嘉晃, 近藤宏二, 山本学, 川本陽一, "LES を用いた高層建築物の風圧予測における中層街区の影響評価", 第 23 回風工学シンポジウム, (2014), pp.283-288.
- (5) "CFD による風荷重評価のガイドライン作成に向けて", 日本建築学会学術講演会 (東海), PD 資料, (2012).
- (6) 例えば, 織茂俊泰, 須田健一, 安藤和博, "バルコニーを有する建築物の壁面ピーク風圧性状について", 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), (2001), pp.145-146.
- (7) Pham Van Phuc, 野津剛, 菊池浩利, 日比一喜, 田村幸雄, "LES によるセットバックした建築物の局部風圧の再現", 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), (2011), pp.3-4.
- (8) 山中徹, 近藤宏二, 山本学, 近藤明洋, "隅切りを有する超高層 RC 集合住宅の耐風設計 (その 1) 設計用風荷重評価", 日本建築学会学術講演梗概集 (東海), (2003), pp.171-172.
- (9) OpenFOAM website, <http://www.openfoam.com/>
- (10) J. Smagorinsky : "General Circulation Experiments with the Primitive Equations in the basic experiment", Monthly Weather Review, Vol.91, (1963), pp. 99-164.
- (11) 伊藤嘉晃, 田村哲郎, 近藤宏二 : "模擬変動風と準周期境界条件により生成した流入変動風の性状", 日本建築学会学術講演梗概集 (近畿), (2014), pp. 131-132.