

複雑表面形状を有する高層建築物を対象とした LES による風圧予測

Wind Pressure Prediction Using Large-Eddy Simulation for High-rise Building with Complex Surface Shape

挾 間 貴 雅 伊 藤 嘉 晃 近 藤 宏 二
山 本 学 田 村 哲 郎¹⁾ 横 川 三 津 夫²⁾

要 約

高精度な数値流体力学手法である Large-Eddy Simulation (LES) を利用しての街区に建つ高層建築物の風圧予測精度の評価を目的に、複雑表面形状を持つ高層建築物を対象に LES を適用し、風洞実験との比較を行った。京コンピュータ上で約 1 億 4 千万メッシュを適用して複雑な表面形状を解像した結果、バルコニー内部やアウターフレーム周りの複雑な流れが再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。LES と風洞実験を比較すると、外圧係数の平均・標準偏差・最大ピーク・最小ピークは、風上側の隅切り部において一部乖離する傾向にあるが、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のパワースペクトル・平均・標準偏差について、LES と実験は良く一致することを示した。

目 次

- I. はじめに
- II. 計算対象および計算条件
- III. 並列計算の方法と性能
- IV. 計算結果
- V. おわりに

I. はじめに

近年の著しい計算機の発達に伴い、高精度な乱流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、Computational Fluid Dynamics (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、格子解像度などの計算条件を適切に設定し、風圧および風力を予測できるようになることを最終的な狙いとし、京コンピュータを用いて大規模並列 LES を実施し、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。

II. 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る。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おり、谷間風等が発生する「連棟効果」が現れる状況である。本問題が適切な精度で予測

1) 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

2) 神戸大学 Kobe University

キーワード: ラージ・エディ シミュレーション, 高層建築物, 複雑表面形状, 風圧予測, インナーバルコニー, 隅切り

Keywords: Large-eddy simulation, high-rise building, complex surface shape, wind pressure prediction, inner balcony, corner cut

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 Fig.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⁾ (Cs=0.12) と共に使用した。Fig.2 に対象建築物の表面近傍計算格子形状を、Fig.3 にインナーバルコニー近傍の計算格子形状を示す。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281分割($\Delta/B=0.003$, 実スケール換算で約13cm, Fig.2・Fig.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、Fig.4 に平均風速および乱流強度プロファイルを示す。Fig.5 に高さ $z/B=3$ における主流方向速度パワースペクトル密度を示す。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¹⁰⁾。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。

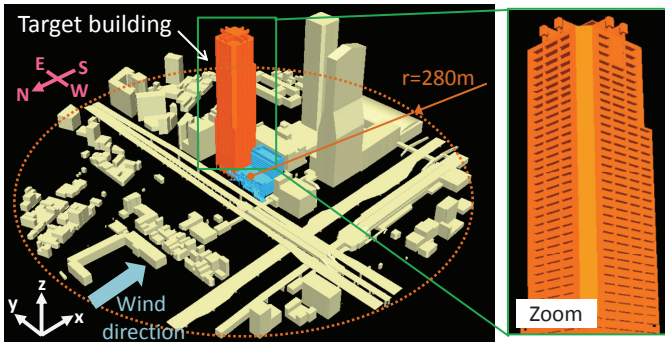


Fig.1 計算対象 (Calculation Target)

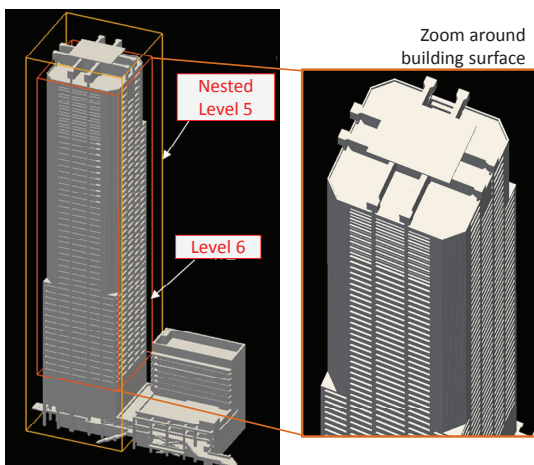


Fig.2 対象建築物表面の計算格子形状 (Calculation Mesh Shape on Surface of Target Building)

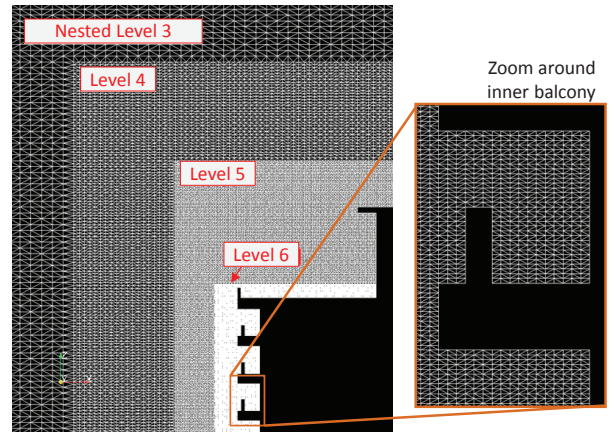


Fig.3 インナーバルコニー近傍の計算格子形状 (Calculation Mesh Configuration of Vicinity of Inner Balcony)

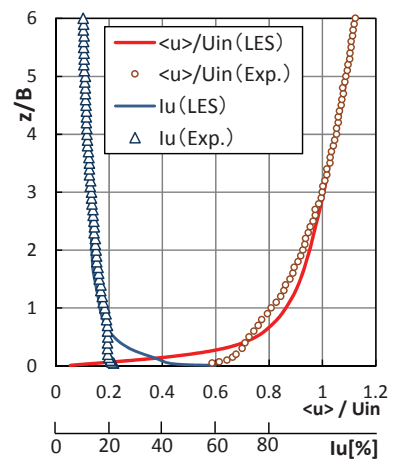


Fig.4 流入境界における平均主流速度および乱流強度の鉛直分布 (Vertical Profile of Stream Wise Velocity and Turbulent Intensity at Inflow Boundary)

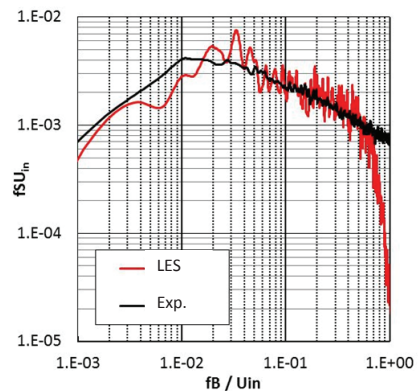


Fig.5 流入境界における主流方向速度パワースペクトル密度 (Power Spectrum of Stream-wise Velocity Component at Inflow Boundary)

Ⅲ. 並列計算の方法と性能

本章では、LES による風圧評価に必要な計算資源および並列計算規模に関して説明する。Fig.6 に計算対象規模と計算機規模との関係を示す。それぞれ、「単体角柱⁴⁾」「中低層市街地に建つ直方体形状の高層建築物⁴⁾」「高層市街地に建つ複雑な表面形状を有する超高層建築物」の計算対象で使用した計算機資源、計算メッシュ数および CPU 並列数を示したものである。本計算で使用した並列手法は

フラット MPI である。計算対象によって求められる計算メッシュ数が増大し、それに伴って必要となる計算機性能が飛躍的に高くなる。本計算は約 1 億 4000 万要素の規模であるため、適切な並列規模である約 1~2 万要素/コアとするには 12288 並列程度が必要となり、京コンピュータクラスの計算資源が必要となる。Fig.7 に並列計算のストロング・スケーリング性能を示す。12288 並列までのストロング・スケーリングを確認した。並列化のストロング・スケーリング性能を見ると、並列数 3072 に対して、並列数 6144 で 1.78 倍、並列数 12288 では 2.45 倍と、並列数の増加に伴い加速性能が鈍化する傾向が見られる。また、6144 並列を超えると MPI 通信に起因するメモリ使用量が爆発的に増大するため、今後 12288 並列を常用する上でこの点を改善する必要がある。使用可能な計算機資源と所要時間とのバランスを考慮して、効率的に計算を進める必要がある。また、効率的な並列計算を行うためには、使用するコードそのものの計算効率を高める必要がある。計算高速化チューニングを実施し、使用した計算コードである OpenFOAM-2.2.1 の基の状態から約 1.5 倍の高速化を達成し、6144 並列時の中央演算処理装置の実行効率 (=実行性能/理論性能×100) を 0.9%から 1.5%に向上させ、3072 並列では 1.7%を達成した。

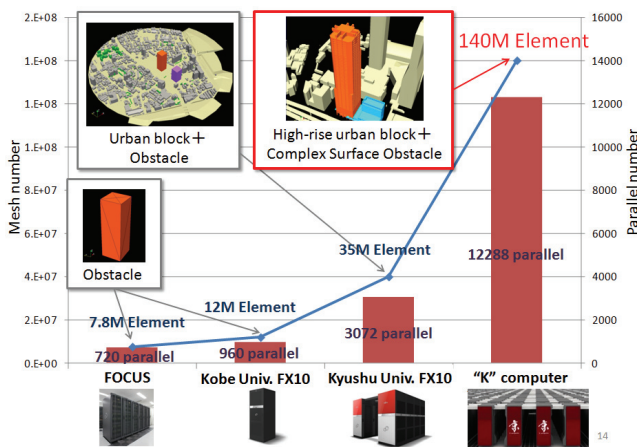


Fig.6 計算対象と計算資源規模

(Computational Resource Scale Corresponding to Calculation Target)

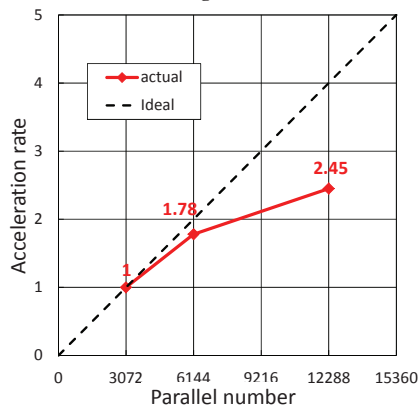


Fig.7 並列計算のストロング・スケーリング性能
(Strong Scaling Performance of Parallel Computing)

IV. 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。Fig.8 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、最小ピーク値を Fig.9 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。Fig.10 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形の放出が再現されている。

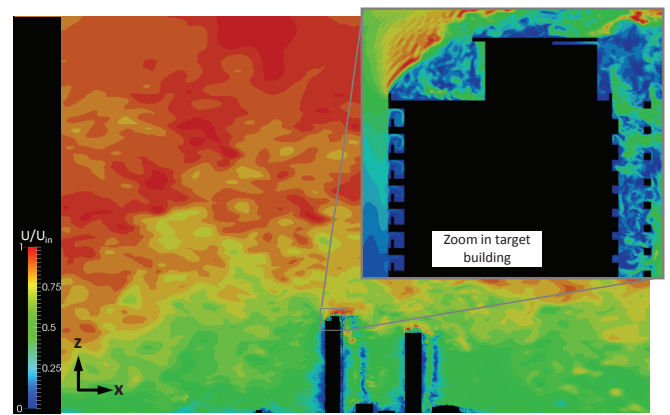


Fig.8 対象建築物中心断面における瞬時速度コンター
(Contour of instantaneous Velocity on Plane of Target Building Center)

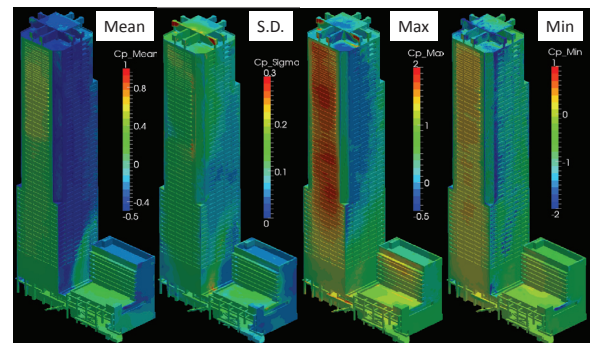


Fig.9 対象建築物表面の各種外圧係数分布コンター
(Contour of Each Pressure Coefficient on Target Building)

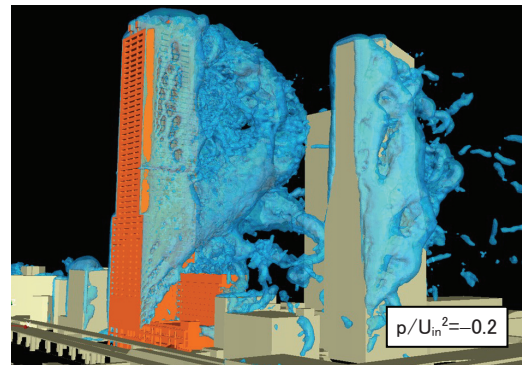


Fig.10 対象建築物まわりの瞬時圧力等値面コンター
(Iso-surface of Instantaneous Pressure around Target Building)

2. 外圧係数の風洞実験結果との比較

Fig.11 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、Fig.11 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。

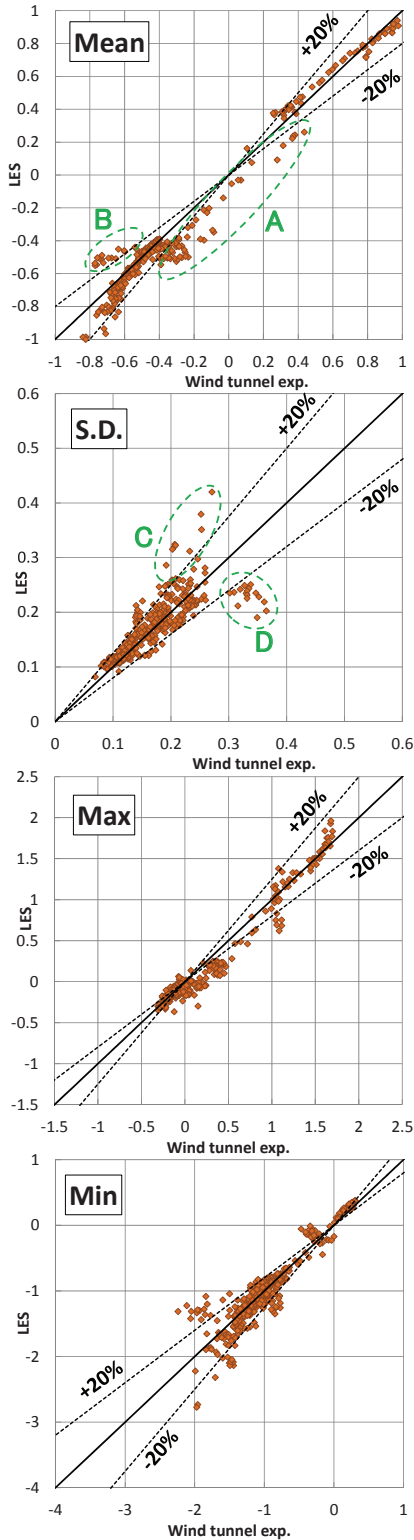


Fig.11 各種外圧係数の比較
(Comparison of Each Wind Pressure Coefficient)

Fig.12 に計測点を、Fig.13 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、Fig.11 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 段ネステイング： $\Delta/B=0.012$ ）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。

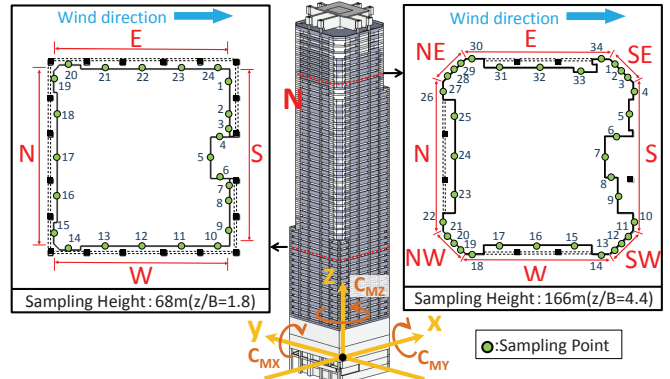


Fig.12 計測点の一部および風力係数の定義
(Part of Measurement Point and Definition of Wind Force Coefficient)

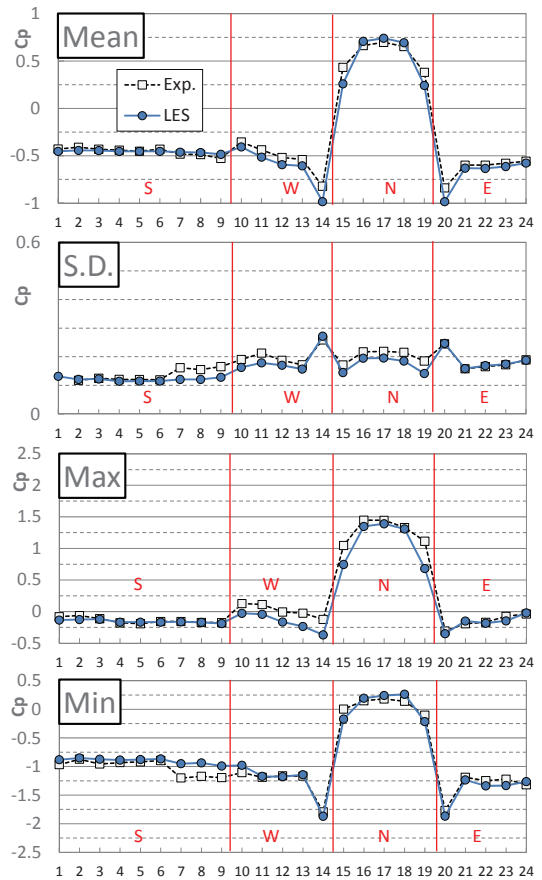


Fig.13 建築物高さ $z/B=1.8$ における外圧係数 (横軸は測定番号)
(Distribution of Each Wind Pressure Coefficient at $z/B=1.8$ (Horizontal axis: measurement number))

Fig.14に高さ $z/B=4.4$ における外圧係数を示す(計測点はFig.12)。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、Fig.11 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、Fig.11 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。

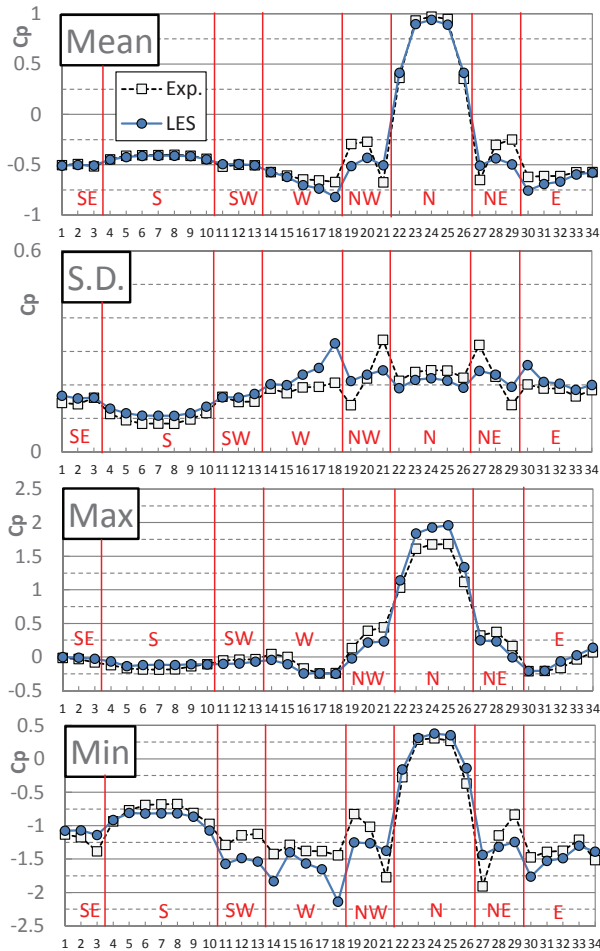


Fig.14 建築物高さ $z/B=4.4$ における外圧係数(横軸は測定点番号)(Distribution of Each Wind Pressure Coefficient at $z/B=4.4$ (Horizontal axis: measurement number))

3. 各種モーメント係数

Fig.15 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 Fig.12)。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短いために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。Table 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。

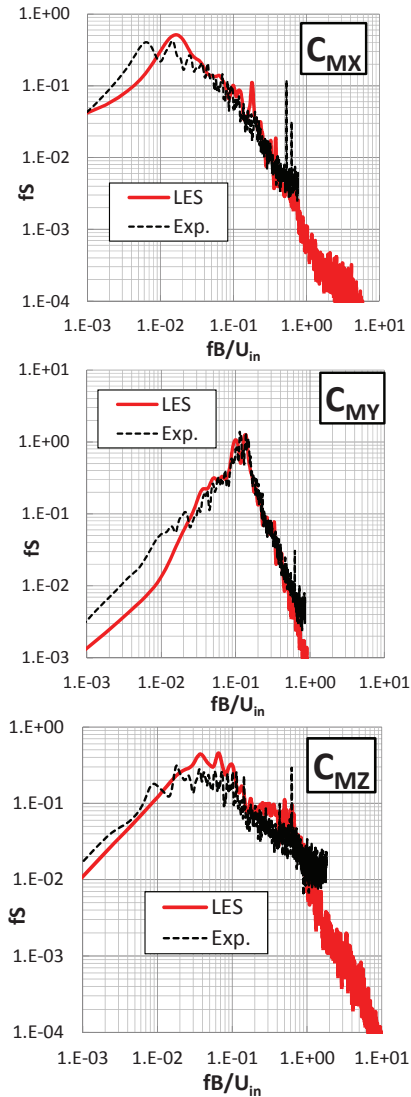


Fig.15 各種モーメント係数パワースペクトル (Each Moment Coefficient Spectrum)

Table 1 各モーメント係数の平均および標準偏差 (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

IV. 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、京コンピュータ上で約 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。
- ・実務展開する上で、各種外圧係数の分布などの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:hp 140187)」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る。

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.
- 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.
- 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.
- 9) OpenFOAM, <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.

Wind Pressure Prediction Using Large-Eddy Simulation for High-rise Building with Complex Surface Shape

*Takamasa Hasama, Yoshiaki Itoh, Koji Kondo,
Manabu Yamamoto, Tetsuro Tamura¹⁾ and Mitsuo Yokokawa²⁾*

To evaluate the prediction accuracy of wind pressure on the high-rise building in urban area using Large-Eddy Simulation (LES) which is a high accuracy computational fluid dynamics method, the LES calculation and the wind tunnel experiments were compared for the high-rise building with complex surface shape. As the result of the complex surface shape resolution by the application of about 140 million calculation meshes on K computer, the 4th fastest supercomputer in the world in 2015, 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.