風上建物の影響を受ける高層建物の変動風圧に関する LES

吉川 優*1・田村 哲郎*2・寺崎 浩*1

Keywords : CFD, LES, wind pressure, high-rise building
CFD，LES，風圧力，高層建物

1. はじめに

近年の計算機能力の向上に伴い，多くの分野で数値流体計算（Computational Fluid Dynamics, CFD）が活用されている。建築工学分野では，室内気流，ビル風，ﾋｰﾄｱｲﾗﾝﾄﾞといった環境系の各種問題に対して，RANS モデルを用いた平均流解析が一般に実施され，実用技術として広く普及している。一方，強風や暴風を対象とした建築物の耐風設計については，現在のところ模型を用いた風洞実験によって設計用風荷重が評価されているが，今後 CFD の適用が期待されており，多くの機関で検証が進められている。構造設計や外装材設計のための風荷重評価には，建物に作用する風力あるいは風圧力の時刻歴データが必要である。これを CFD で得るためには LES（Large Eddy Simulation）による非定常解析が有効であるが，高い時空間分解能が要求されるとともに，より詳細な精度検証が必須である。

著者らはこれまでに，耐風設計における風荷重評価に LES を適用することを目的として，その基本精度検証を実施してきた。高層建物に関しては，基礎的なモデルとして角柱単体での計算を行い，風洞実験値との比較に基づいてその有効性を確認している [1)]。 特に計算モデルについて，物体形状や格子解像度に対する自由度の高さから非構造格子系に着目し，その適用性・妥当性を示した。

今後，建築物の耐風設計において LES を実用化するためには，より複雑なモデルに対する適用性を検証してゆく必要がある。実際の建築物に関しては，建物形状の多様性のみならず，周辺市街地の状況も様々であり，多くの場合，周辺建物の影響を受けた風が建築物に作用している。特に，風上側に同規模の高層建物が存在する場合，配置や風向に応じて風圧力や風力が増加することが知られており， LES の実用化に際しては，周辺建物の影響についても計算精度を確保することが重要である。

本研究では，複雑なモデルの応用例として，風上建物の存在によって局所的に風圧力が増加する高層建物の事例について LES の計算精度を検証する。

2. 風洞実験概要

LES の計算精度は，別途実施された風洞実験 [2),3)]の結果と比較することにより行う。風洞実験は，建物の幅（*B*）50m，奥行（*D*）50m，高さ（*H*）200m の角柱建物（アスペクト比 4）を対象とした多点風圧実験である（図-1）。模型縮尺率は 1/500 とし，壁面に計 476 点の風圧測定点を設けている（図-2）。

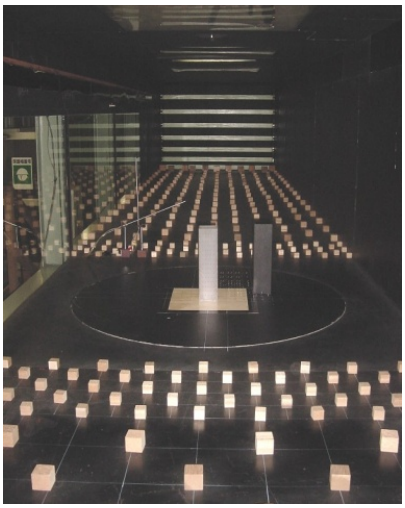


図-1 風洞実験
Fig.1 Wind tunnel expeirment

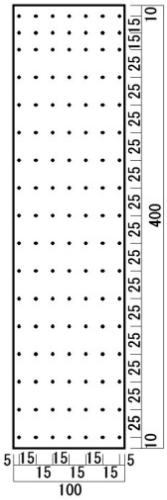


図-2 風圧測定点
Fig.2 Measurement points of wind pressure

＊1 技術センター 建築技術研究所 防災研究室
＊2 東京工業大学

風洞気流は地表面粗度区分Ⅲを目標とし，建物代表高さ H における実験風速は 11.5m/s である。実験では，風上側に別の建物模型を一点配置し，風上建物規模，建物間距離，相対角度，実験風向をパラメータとして検討建物模型の風圧計測が行われた。多数の実験結果より，風上側に同規模の建物が存在する際，図-3 の条件において検討建物の側面端部で非常に強い負圧側ピーク風圧係数が発生した（単体の場合の約 6 割増）。

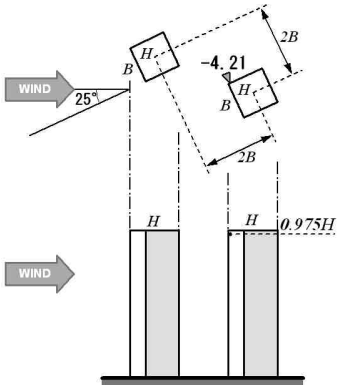


図-3　最大負圧ピーク発生条件
Fig.3　Occurrence of the highest negative peak pressure

3.　計算条件

3.1　計算手法

図-3 の事例を対象として LES を実施し，風下側の検討建物における変動風圧場の再現性について検証する。支配方程式は非圧縮性の Navier-Stokes 方程式および連続の式であり，離散化手法は FVM，乱流モデルは標準 Smagorinsky モデルを使用した（Cs=0.15）。計算格子はテトラ要素を主とする非構造格子とした。

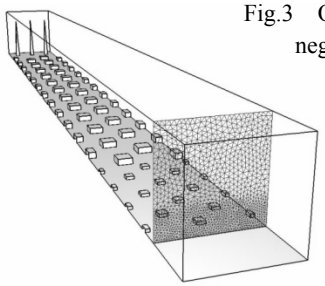


図-4　流入変動風作成モデル
Fig.4　Computational model for inflow turbulence

3.2　流入変動風

LES の流入境界条件として必要となる流入変動風（自然風を模擬した時刻歴変動風速）は，図-4 に示す計算モデルを用いて予め作成した。本モデルは風洞気流作成法に倣って自然風特性を再現するものである。すなわち，スパイヤおよびラフネスブロックを用いて直接的に乱流境界層を発達させるものである。流出境界近傍において主流直交断面を仮想的に設け，同面内の全節点における風速（３成分）の時刻歴を保存して主計算用の流入変動風データとした。

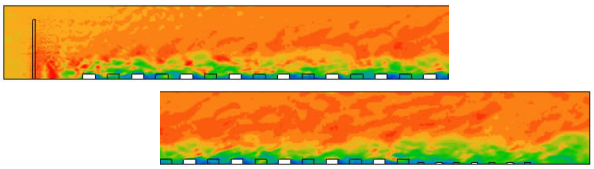


図-5　流入変動風作成モデルの瞬間風速コンター
Fig.5　Contour of instantaneous velocity

本モデルによる計算結果（瞬間風速コンター）を図-5 に示す。また，作成した流入変動風のプロファイルについて実験気流と比較した結果を図-6 に示す。図より，計算で得られた流入変動風は，実験気流特性を概ね再現できていることがわかる。

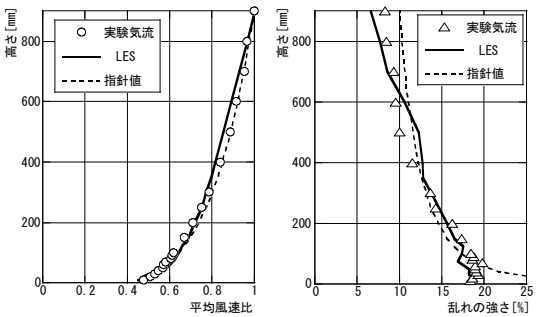


図-6　流入変動風のプロファイル
Fig.6　Velocity profiles of inflow turbulence

3.3　計算モデル

角柱２棟を含む主計算モデルを図-7 に示す。計算領域規模は，幅 20B，高さ 15B，主流方向長さ 30B である。角柱２棟の配置については，図-3 に示した実験条件を再現した。流入境界面において，前節の手法で保存された流入変動風データを各時刻ステップごとに与えて非定常計算を実施する。上空面および側面の境界条件はフリースリップ，流出面の境界条件は表面圧力 0Pa とした。建物壁面および床面には壁関数（Werner Wengle の 3layer ﾓﾃﾞﾙ）を与えた。

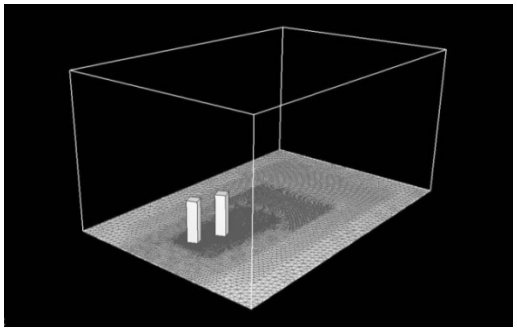


図-7　角柱２棟を含む主計算モデル
Fig.7　Computational model for building models

風下側の検討建物壁面において，実験と同座標の時刻歴変動圧力値をサンプリングした。

3.4 計算格子

計算格子は，テトラ要素を主とする非構造格子系とする。要素配置は，予め指定された密度分布に基づいてアドバンシングフロント法により自動生成されたものである。全計算領域の計算格子（水平断面）を図-8 に，角柱近傍における計算格子（水平断面）を図-9 に示す。格子解像度については，上空領域から角柱近傍に向けて連続的に解像度を上げ，風下側の検討建物隅角部を最も高解像度となるよう設定した。その際の要素寸法の目安としては，上空で約 B，検討建物隅角部で約 $B/64$ である。なお，本モデルでは，風上側建物から発生する剥離せん断層の挙動や後流域における渦構造が検討建物壁面における変動圧力場に影響を与えることを考慮し，建物間の一部の領域において十分な解像度を確保するよう配慮した。また，建物壁面および床面においては，境界層要素としてプリズム要素を 3 層ずつ挿入している。本モデルの節点数は約 144 万，要素数は約 740 万である。

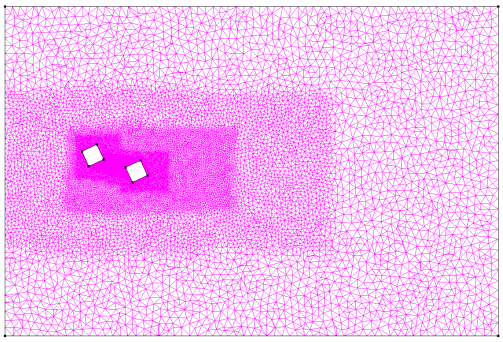


図-8 計算格子（全領域）
Fig.8 Grid system (whole domain)

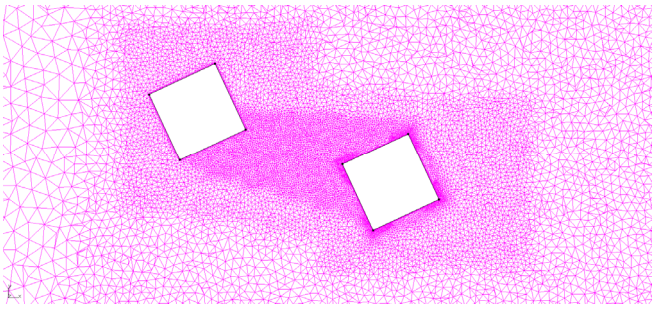


図-9 計算格子（角柱近傍）
Fig.9 Grid system (near the building models)

4. 計算結果

4.1 分析手法

計算結果の一例として，瞬間場における検討建物の圧力分布および周囲の空間における負圧等値面を図-10 に示す。本計算では，検討建物において実験の圧力測定点と同座標における時刻歴変動圧力が得られており，これらについて代表高さ（H=0.4m）における接近流の平均風速から求めた速度圧を用いて風圧係数 C_p を求めている。ここで，計算における圧力定義点（格子節点）は必ずしも実験の測定点と一致しないため，計算では当該座標に対して近傍節点から補間してサンプリングしている。

風圧係数の統計値の算出法は実験と同一とした。すなわち，各時刻歴風圧波形に対して 1 秒移動平均（実大相当）を施し，10 分間波形ごとに平均値 C_{pm}，変動値（標準偏差）C_{ps}，ピーク値（正負）C_{pmax} C_{pmin} を求めてアンサンブル平均を行った。アンサンブル平均回数は，実験・計算ともに 6 回である。

4.2 全測定点に関する計算値と実験値の相関

全風圧測定点（476 点）の風圧係数に関する計算値と実験値との相関図を図-11 に示す。変動風圧係数および各ピーク風圧係数について，計算値は実験値よりも絶対値が若干大きくなる傾向があるが，全体的に良い対応を示しており，相関が高いことがわかる。

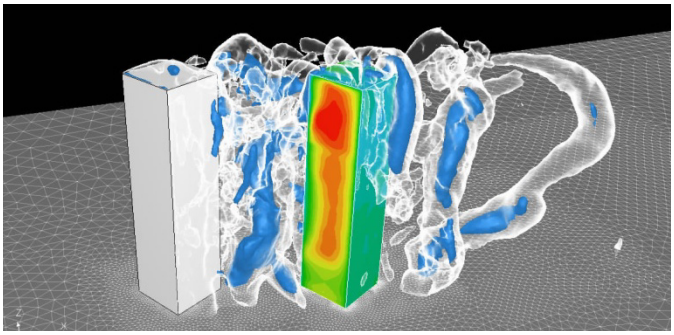


図-10 計算結果（瞬間圧力分布）
Fig.10 Computed result (instantaneous pressure distribution)

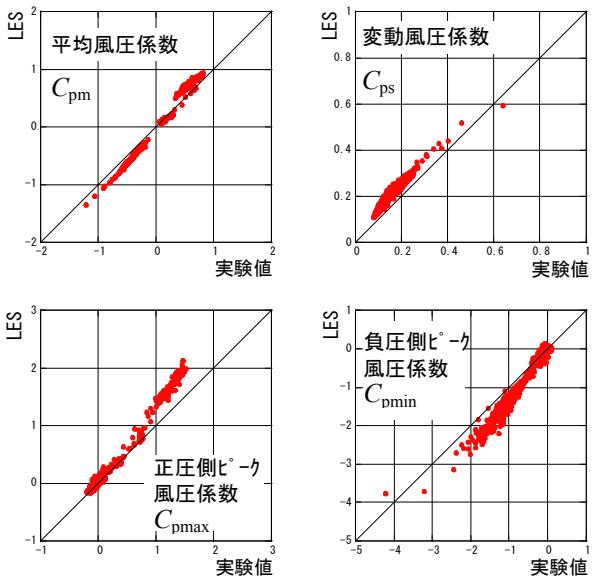


図-11 風圧係数の相関図
Fig.11 Correlations of pressure coefficients

4.3　風圧係数の空間分布に関する比較

検討建物の水平断面における風圧係数の空間分布について計算値と実験値とを比較した結果を図-12 に示す。左図は中央高さ付近の風圧測定層（z=0.525H）の分布であり，右図は頂部付近の風圧測定層（z=0.975H）の分布である。風上面（x/B=0～1）における正圧側ピーク風圧係数および側面・背面（x/B=1～4）における負圧側ピーク風圧係数に関して計算値は絶対値を大きく評価しているものの，全体的な分布形状は良く対応している。実験で強い負圧側ピーク風圧係数が計測された点（z=0.975H, x/B=3.95）に関しては，実験値-4.21 に対して計算値は-3.77 であった。

4.4　ピーク負圧が発生した瞬間の流れ場

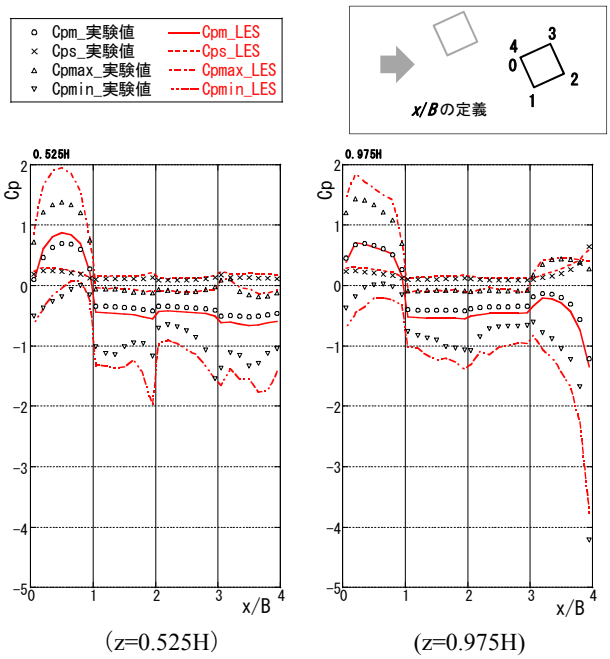
風速や風圧といった物理量に関して，流れの構造を簡易に可視化できる点が CFD の長所のひとつである。図-13 は，前節で述べた負圧側ピーク風圧発生箇所において，計算で負圧側ピーク値が発生した時点（10 分間波形×6 波の各ピークの内のひとつ）の瞬間流れ場である。図は z=0.975H の水平断面における流速ベクトル分布を示している。図より，風上建物からの剥離せん断層が検討建物の風上側隅角部と干渉し，ピーク負圧発生位置を覆うように局所的な剥離泡を形成していることが確認される。

5.　まとめ

風上建物の影響を受けて局所的にピーク風圧が増加する高層建物の事例について LES を実施し，風洞実験結果と比較することによって計算精度の検証を行った。計算に基づく風圧係数は，空間分布傾向を含めて実験値と良く対応し，LES が概ね良い精度で現象を再現できることが確認された。

本研究結果より，基礎的な角柱単体モデルに引き続き，周辺建物の影響に関する一応用事例についても非構造格子系 LES の妥当性が示された。

今後は，本モデルの風向や建物配置・規模といったパラメータに対する精度検証の他，多様な建物・市街地モデルのパターンについても検証を重ね，LES の実用化を目指す。



（z=0.525H）　　(z=0.975H)

図-12　風圧係数の空間分布

Fig.12　Distributions of pressure coefficients

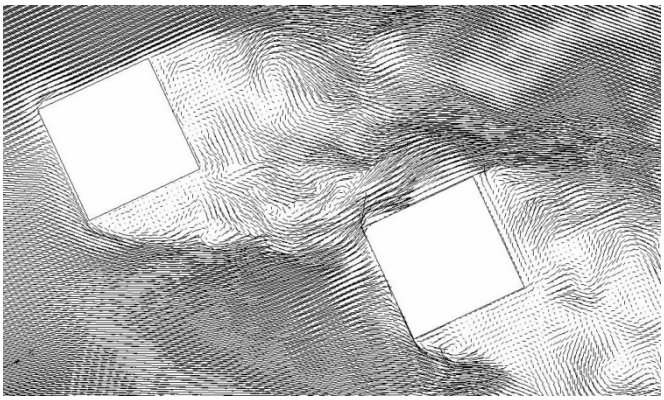


図-13　瞬間流れ場

Fig.13　Instantaneous vector field

参考文献

1) 吉川優，田村哲郎：非構造格子系 LES による３次元角柱の変動風圧評価－建築物の耐風設計のための非構造格子系 LES の構築（その１）－，日本建築学会構造系論文集，第 78 巻，第 687 号，pp.913-921，2013.
2) 寺崎浩，中村良平：風上側の建物が高層建物の外装材用風荷重に与える影響，第 21 回風工学シンポジウム，pp.299-304，2010.
3) 寺崎浩，中村良平：風上の建物が高層建物の外圧係数・風振動に与える影響，大成建設技術センター報，第 43 号，2010.