

CFDによる建築物の耐風設計の実現に向けた精度検証

酒井 佑樹 伊藤 靖晃 野津 剛 田村 哲郎
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (東京工業大学)

Accuracy Verification of CFD to Wind Resistant Design of Building

Yuki Sakai, Yasuaki Ito, Tsuyoshi Nozu and Tetsuro Tamura

近年の計算機能力の向上に伴い、数値流体計算(CFD)を建築物の耐風設計に適用することが期待されている。しかし、計算コストをより低く抑える事が課題である。本研究では、まず計算領域全体を細かい格子で構成した大規模 LES の計算モデルを構築し、その結果を風洞実験結果と比較することで計算モデルの妥当性の確認を行う。次に、格子数を減らして計算負荷を低減した LES の計算モデルを構築し、その結果を大規模 LES の結果と比較することで、格子解像度が計算結果に及ぼす影響について検討する。その結果、対象建築物の風上側の格子解像度が局所的な風圧係数の再現性に影響を及ぼす可能性があることを明らかにした。

CFD is expected to apply to wind resistant design because computer performance has been improved. However, it is necessary that the calculation cost of LES becomes lower in order to realize wind resistant design by CFD. This study performs the validation of the wind load evaluation in respect to large scale LES and reduced cost calculation LES which is reduced the total number of cells. CFD evaluation based on the two calculations provide that reproducibility of wind pressure can be locally varied due to the grid resolution on the windward side of a target building.

1. はじめに

複雑な表面形状の高層建築物の設計および建設が増加しつつある昨今においては、このような特徴を有する建築物の耐風設計には注意を払う必要がある。建築物の耐風設計では建築基準法施行令において、建設省告示 1454 号および 1458 号に示された風力係数を用いることが定められており、また、告示において風洞実験により得られた風力係数を用いることが認められている。複雑な表面形状の建築物の耐風設計では、建設省告示 1454 号および 1458 号に示されている風力係数を用いることが適切ではない場合も多いことから、風洞実験を実施することにより風力係数を求める。しかし、複雑な表面形状の建築物が設計される度に風洞実験を実施することは模型製作等で労力を要する。

一方で、近年の計算機能力の著しい向上に伴い、数値流体計算(CFD)により風洞実験結果と同等の風圧や風速分布の取得が可能となりつつあることが報告されている¹⁾³⁾。また、「S18 風圧力、耐風設計等の基準への数値流体計算への導入に関する検討」が建築基準整備促進事業の調査テーマと

して推進されたことから、建築物の耐風設計への CFD の実用化が期待されている。さらに、建築物荷重指針・同解説(2015)⁴⁾では既に CFD を用いた風荷重評価の項目が導入されており、建築物荷重指針を活かす設計資料 2—建築物の風応答・風荷重評価/CFD 適用ガイド⁵⁾では、建築構造分野において耐風設計を行う際に、荷重を適切に算定するための CFD の適用方法を示した「CFD 適用ガイド」が整備されている。

CFD による建築物の風荷重評価では、対象建築物の形状や周辺市街地の影響を受けて形成される流れ場の予測が重要となる。そこで、乱流場まで精度良く予測可能な非定常解析手法である Large Eddy Simulation(LES)を用いることが有用であり、多くの既往の研究においても、計算領域全体を細かい格子で構成した大規模な LES による建築物の風荷重評価の検討が行われている⁶⁾⁹⁾。しかし、大規模な計算は京コンピュータ等のスーパーコンピュータを利用して実施されている場合が多く^{10),11)}、また、実際の耐風設計のための風洞実験では多風向からの風に対して風荷重の評価が行われることから、大規模で高解像度の CFD により実際の建築物の耐風設計を行うことは、計算コス

トの面から現状では困難であると考えられる。そこで、格子数を減らして計算負荷を低減した計算の耐風設計への適用が求められるが、格子解像度が対象建築物の風荷重評価に及ぼす影響について検討する必要がある¹²⁾。特に対象建築物が風向に対して正対せず、隅角部が風上側にあるような傾いた風向を対象とした計算では、風上側および風下側の隅角部付近で非対称な風圧係数分布となることが想定されるため、その再現性の検討が重要である¹³⁾。

本研究では、仮想市街地に建つ複雑形状高層建築物を対象として、風向に対して対象建築物を45度回転させたLESを実施する。まず計算領域全体を細かい格子で構成した大規模LESの計算モデルを構築し、その結果を風洞実験結果と比較することで計算モデルの妥当性の確認を行う。次に、格子数を減らして計算負荷を低減したLESの計算モデルを構築し、その結果を大規模LESの結果と比較することで、対象建築物の風上側の格子解像度が計算結果に及ぼす影響について検討する。

2. 計算対象

計算対象は、仮想市街地に建つ複雑表面形状を有する高層建築物(高さ128m)とする(図-1)。対象建築物の特徴としては、壁面には庇が取り付けられており、屋上には冠壁が存在する。さらに、対象建築物のE面側はセットバックした形状となっている。また、隅角部が風上側にあるような傾いた風向を対象とした計算では、風上側および風下側の隅角部付近で非対称な風圧係数分布となることが想定されるため、その再現性の検討が重要である。そのため、風向に対して対象建築物を45度回転させた計算を実施する。周辺市街地は対象建築物を中心として半径400mの範囲に存在している。

3. 計算手法

3.1 LESの基礎方程式

LESの基礎方程式としては、フィルターをかけた非圧縮流れの連続の式とNavier-Stokes方程式である。これらの式は以下のように表せる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij} + 2\nu \bar{D}_{ij}) \quad (2)$$

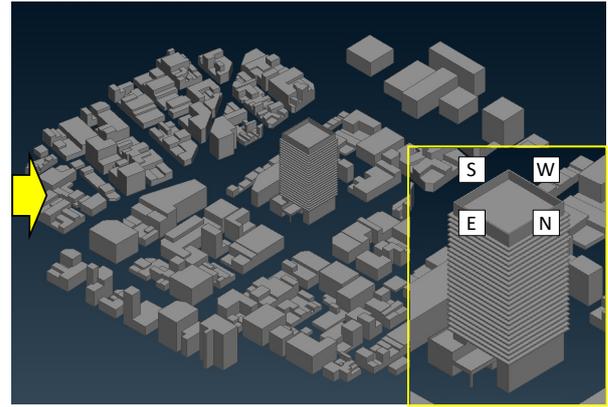


図-1 計算対象

ただし、

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4)$$

u_i は風速の*i*成分 ($i=1\sim 3$)、 t は時間、 p は圧力、 ρ は空気密度、 ν は動粘性係数を表す。本研究では乱流モデルに標準Smagorinskyモデルを用いるため、基礎方程式は以下のように表せる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{2(\nu + \nu_e) \bar{D}_{ij}\} \quad (5)$$

ただし、

$$\nu_e = (C_s f_s \Delta)^2 |\bar{D}| \quad (6)$$

$$f_s = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{26}\right) \quad (7)$$

$$\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3} \quad (8)$$

$$|\bar{D}| = \sqrt{2\bar{D}_{ij}\bar{D}_{ij}} \quad (9)$$

モデル係数 C_s は 0.1 とする^{5),14)}。

本計算では総要素数が数億規模の計算モデルである大規模LESをCASE1、総要素数が数千万規模の計算モデルである計算負荷を低減したLESをCASE2とする。計算は、CASE1についてはFrontFlow Red(HPC版)により実施し、CASE2についてはNuFD/FrontFlow Redにより実施する。

3.2 計算条件

方程式の離散化は有限体積法を使用する。速度の

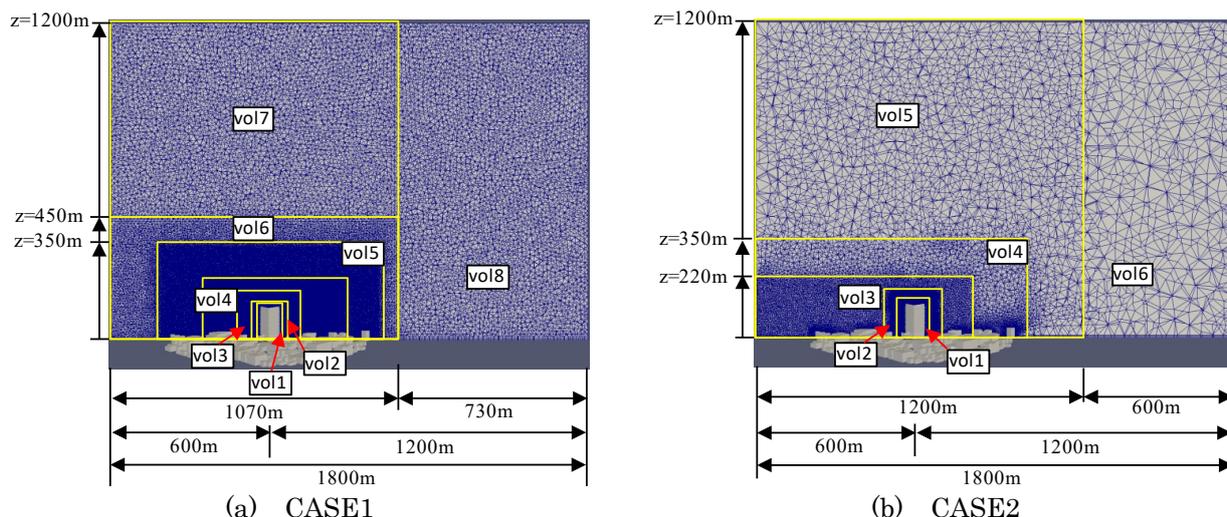


図-2 格子の概要

表-1 境界条件

CASE1	速度	圧力	CASE2	速度	圧力
流入面	平成27年度建築基準整備促進事業の流入変動風 (SEM) 地表面粗度区分III相当	Neumann条件	流入面	平成27年度建築基準整備促進事業の流入変動風 (SEM) 地表面粗度区分III相当	Neumann条件
流出面	Neumann条件	Neumann条件	流出面	Neumann条件	p = 0
建物表面・床面	Spalding則	Neumann条件	建物表面・床面	Spalding則	Neumann条件
上面	Free-Slip	Neumann条件	上面	Free-Slip	Neumann条件
側面	Free-Slip	Neumann条件	側面	Free-Slip	Neumann条件

各成分および圧力はセルの節点に配置される。計算アルゴリズムはSMAC法を使用する。時間積分はEuler陰解法を用いる。FrontFlow Red(HPC版)では、任意の領域毎に数値粘性をブレンドする割合を設定できる。そのため、空間離散化は、拡散項は2次精度中心差分、移流項 ϕ_α は式(10)に示す2次精度中心差分 ϕ_{c2d} と1次精度風上差分 ϕ_{1st} のブレンド式を用いる。CASE1ではブレンドファクター α を0.95として計算を実施する。一方、CASE2は一部で若干歪んだ格子があるため、計算安定性を確保するためにブレンドファクター α を0.8~0.9として計算を実施する。

$$\phi_\alpha = \alpha\phi_{c2d} + (1 - \alpha)\phi_{1st} \quad (10)$$

α : ブレンドファクター

ϕ_{c2d} : 2次精度中心差分による離散化

ϕ_{1st} : 1次精度風上差分による離散化

3.3 計算領域および計算格子

計算領域は実スケールで長さ1800m×幅1200m×高さ1200mである。格子は非構造格子系で生成する。格子の概要を図-2に示す。CASE1は計算領域を8種類の格子解像度で分割している。また、

CASE2は計算領域を6種類の格子解像度で分割している。CASE1およびCASE2は、地表面および建物表面に沿っては境界層格子を3層入れている。対象建築物近傍では両CASEで同等の格子解像度としている。総要素数は、CASE1は2億3000万要素、CASE2は6500万要素である。

3.4 境界条件

各CASEの境界条件を表-1に示す。流出面の圧力の境界条件は各CASEで異なるが、対象建築物や周辺市街地の位置から流出面までの距離を十分に離すことにより、圧力の流出境界条件が異なる場合においても流れ場への影響がほとんど無いことを確認した⁵⁾。流入面にはJarrinら¹⁵⁾の合成渦法を基に生成された平成27年度建築基準整備促進事業の流入変動風を与える。Jarrinらの合成渦法で作成した風速の時刻歴は連続式を満たさない。そのため平成27年度建築基準整備促進事業では、Jarrinらの合成渦法で作成した風速の時刻歴を流入境界条件として与え、多少の吹走距離のもとでLESを実施した¹⁶⁾。これにより、連続式を満たした流入変動風を生成している。

流入変動風の対象建築物の高さ(地上128m)での平均風速は10m/s、風速の鉛直分布は地表面粗度区

分Ⅲ相当とした。図-3に流入変動風の主流方向成分の鉛直分布、図-4に対象建築物の高さにおける流入変動風の主流方向成分のパワースペクトル密度を示す。図-4では、縦軸がパワースペクトル密度 fSu/σ_u^2 、横軸は無次元周波数 fLu/U_H を意味する。流入変動風に関して、図-3および図-4ではCFDと表す。比較のため、図-3には建築物荷重指針・同解説(2015)⁴⁾の地表面粗度区分Ⅲの風速の鉛直分布を示し、図-4にはカルマン型のパワースペクトル密度を图中Karmanとして示す。流入変動風はLESにより別途計算して生成しているため、格子解像度の影響により高周波成分のパワーが落ちているが、それ以外の周波数ではカルマン型のパワースペクトル密度と対応している。

4. 計算結果

4.1 CASE1の計算モデルの妥当性の確認

図-5にCASE1の計算結果(CASE1)と風洞実験結果(EXP)の相関図を示す。図中には計算結果と風洞実験結果の差異20%を表す点線も示す。計算結果は実時間10分相当のアンサンブル平均3回の結果であり、実験結果は実時間10分相当のアンサンブル平均9回の結果を示している。図-5の相関図から、CASE1の計算結果の風圧係数の平均値、変動値、最大ピーク値は概ね実験結果と対応していることが確認できる。最小ピーク値については、0付近の非常に小さな値となる測定点では僅かに差異があることが確認できるが、その差異は非常に小さい。次に、図-6に対象建築物の各階における風圧係数分布を示す。図-6の左軸は風圧係数の平均値、最大・最小ピーク値であり、右軸は風圧係数の変動値である。この結果から、風圧係数の最小ピーク値の差異は対象建築物の風上側および風下側の隅角部で生じていることが確認できる。この理由として、風洞実験模型精度や風洞実験とCFDの圧力データの測定位置の僅かな違い等が複合的に影響したものと推測される。しかし、全体的に風圧係数分布の差異は小さいことから、CASE1の計算結果は風洞実験結果と同等の結果が得られる計算モデルであると考えられる。

4.2 CASE1とCASE2の計算結果の比較

図-7にCASE1の計算結果(CASE1)とCASE2の計算結果(CASE2)の相関図、図-8に各階の風圧係数分布を示す。図-8の左軸は風圧係数の平均値、最大・最小ピーク値であり、右軸は風圧係数の変動

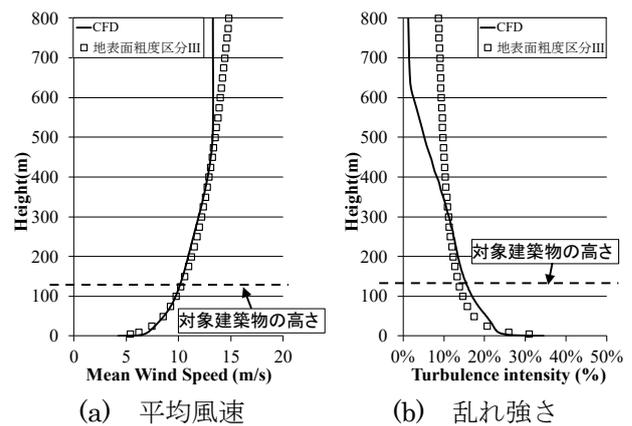


図-3 流入変動風の主流方向 u 成分の鉛直分布

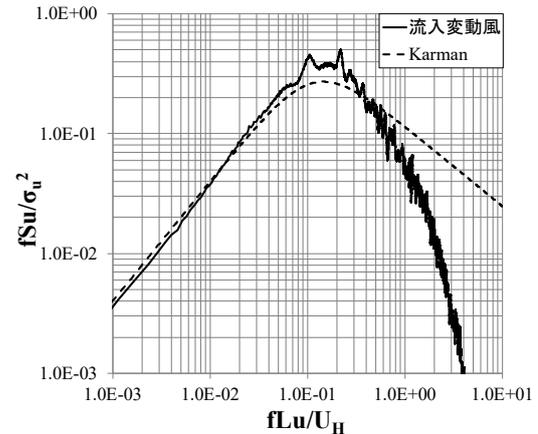


図-4 流入変動風の主流方向 u 成分のパワースペクトル密度

値である。計算結果はそれぞれ実時間10分相当のアンサンブル平均3回の結果である。図-7から、平均値は概ね同程度の結果になっている。一方で、変動値、最大ピーク値および最小ピーク値の絶対値は、CASE1と比べてCASE2で過小評価になる傾向が確認できる。特に変動値と最大ピーク値は各測定点で全体的に過小評価となる傾向が見られる。これは、CASE1に対してCASE2の方が移流項の2次精度中心差分のブレンドファクターを僅かに小さく設定することで数値粘性が若干大きくなっていること、および対象建築物の風上側で格子解像度を低くしていることが原因であると考えられる。ただし、変動値および最大ピーク値については、差異20%以内に収まっている。一方で、最小ピーク値については差異が20%以上ある測定点が多数見られる。最小ピーク値の差異の現れ方については、変動値や最大ピーク値のように各測定点で全体的に過小評価となる傾向ではないため、図-8の各階の風圧係数分布から最小ピーク値の差異が大きい測定点の場所を明らかにすることを試みる。

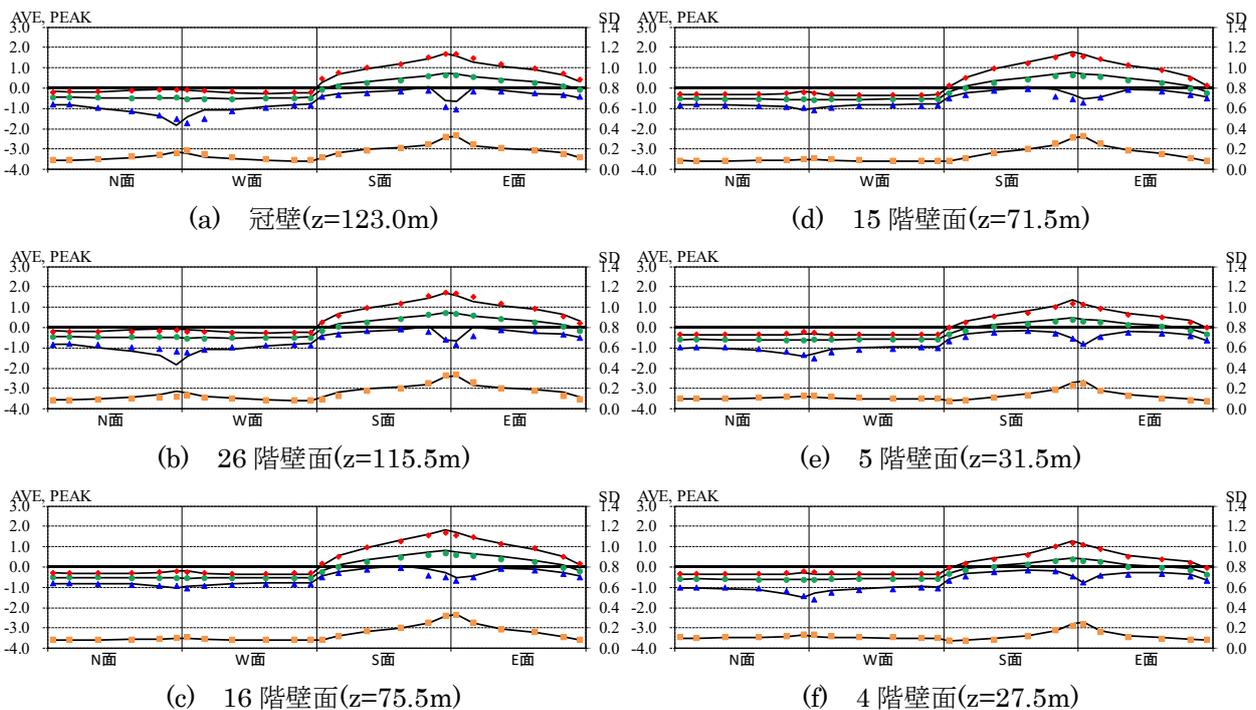
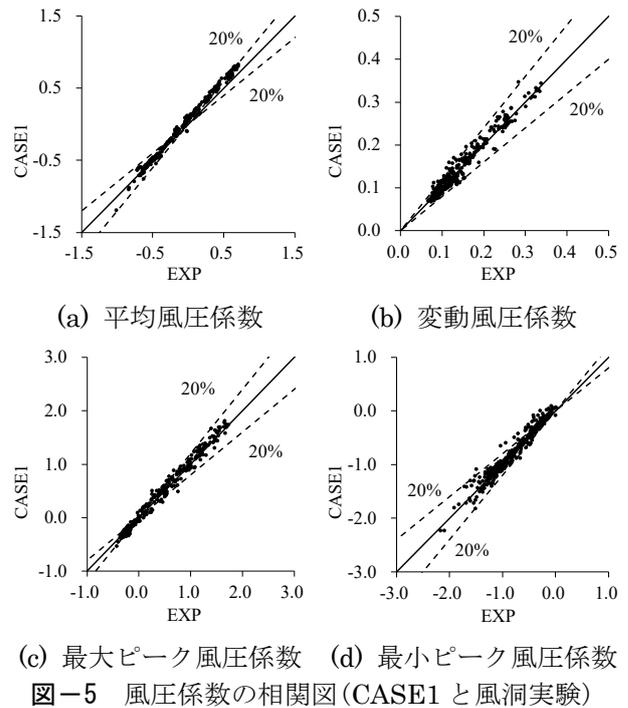
図-8から、各階において風上側の隅角部(S-E面)付近の最小ピーク値で差異が見られる。この差異は、

低層階よりも高層階の方が顕著に現れている。低層階から中層階までは風上側の周辺建物からの風の流れの剥離の影響で、対象建築物の風上側隅角部(S-E面)付近の風圧係数が決定されると考えられる。しかし高層階の風上側隅角部(S-E面)付近には、流入変動風が周辺建物の影響をほとんど受けることなく到達するため、風圧係数は格子解像度や空間離散化等の計算モデルに依存して決まると考えられる。したがって、風上側の隅角部(S-E面)付近の最小ピーク値の差異は、対象建築物の風上側の格子解像度や移流項の空間離散化のブレンドファクターの設定に伴う数値粘性が影響して生じているものと考えられる。次に、CASE1の冠壁(z=123m)および26階(z=115.5m)における風下側の隅角部(N-W面)の最小ピーク値の絶対値はN面側で大きな値が現れており、CASE2ではW面側で大きな値が現れている。これは、対象建築物の風上遠方の格子解像度が影響していると考えられるため、そのメカニズムについて考察する。

4.3 対象建築物の風下側で現れる局所的なピーク風圧係数の発生メカニズムの考察

図-9～図-14にz=128mにおける瞬間風速の流れ線と瞬間圧力分布、風圧係数 C_p の時刻歴波形を示す。図-11に示すように、CASE1ではN面側で瞬間的に大きな負のピーク値が現れている。図-9および

図-10から、冠壁の内側のN-E面側に大きな負圧が生じることで、流れが引き寄せられて形成される複雑な流れ場の影響で、対象建築物頂部での流れが僅かにN面側に歪められている様子が確認できる。一方で、図-14に示すように、CASE2ではW面側で瞬間的に大きな負のピーク値が現れている。図-12および図-13から、冠壁の内側のS-W面側に大きな負圧が生じることで、流れが引き寄せられて形



CASE1の計算結果：ライン 風洞実験結果：●平均 ■変動 ◆最大 ▲最小
図-6 各階の風圧係数分布(CASE1と風洞実験)

成される複雑な流れ場の影響で、対象建築物頂部での流れが僅かにW面側に歪められている様子が確認できる。さらに、図-15に示すCASE2の風下側隅角部の瞬間風速の流線と瞬間圧力分布から、剥離域での渦の形成に伴い、瞬間的かつ局所的にW面側で大きな負圧が生じていることが確認できる。したがって、両CASEでは対象建築物近傍の格子解像度は同等としているため、対象建築物の風上側の格子解像度が接近流に影響を及ぼし、風圧係数のピーク値の再現性に影響する可能性があるかと推測できる。

5. まとめ

本研究では、仮想市街地に建つ複雑表面形状を有する高層建築物を対象として総要素数が数億規模の大規模な計算モデルと総要素数が数千万規模の計算負荷を低減した計算モデルを作成し、風向に対して対象建築物を45度回転させたLESを実施した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) CASE1の計算から得られた風圧係数は風洞実験結果と概ね対応していたため、CASE1は風洞実験と同等の結果が得られる計算モデルであると考えられる。
- 2) CASE2の計算結果はCASE1の計算結果と比べて、風圧係数の変動値と最大ピーク値が各測定点で全体的に過小評価となる傾向が見られた。また、

CASE1とCASE2の風圧係数分布を比較すると、風上側の隅角部(S-E面)付近の高層階高さでの最小ピーク値で顕著な差異が見られた。これは、高層階高さでは、流入変動風が周辺建物の影響をほとんど受けることなく対象建築物に到達することに起因する。したがって、これらの差異はCASE2では対象建築物風上側の格子解像度が低いことや、数値粘性を若干大きく設定しているこ

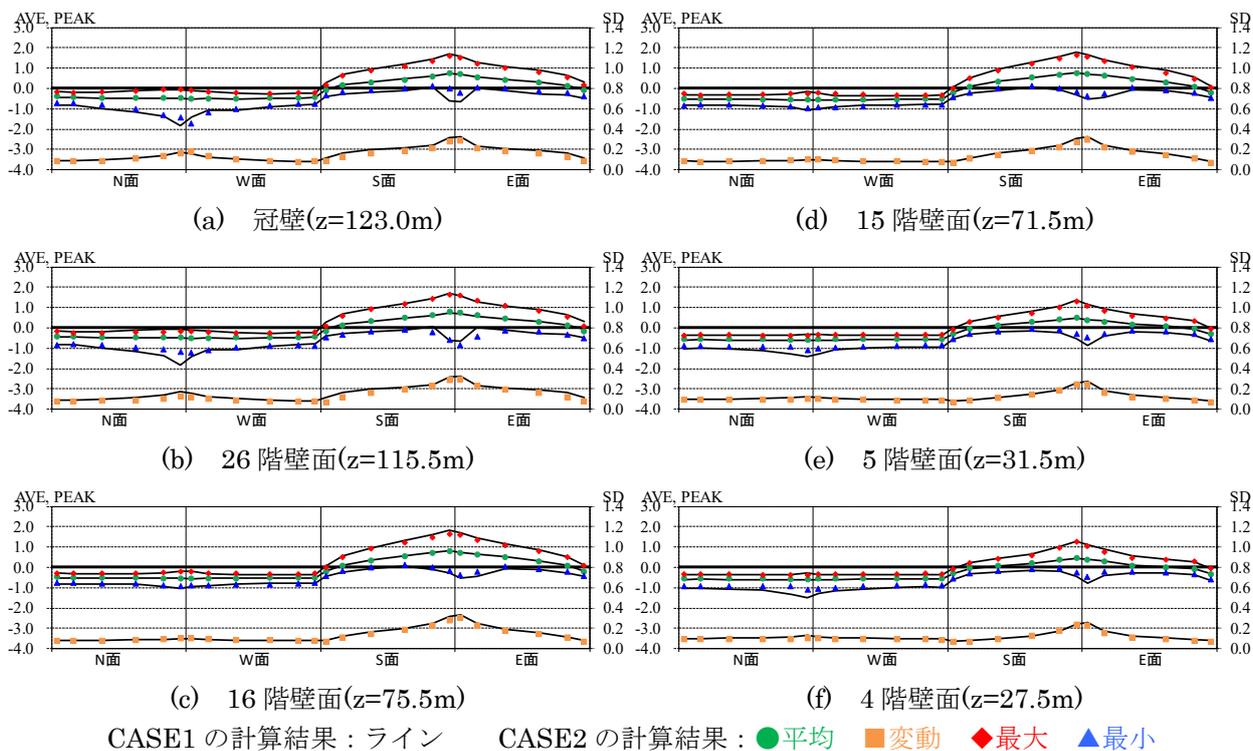
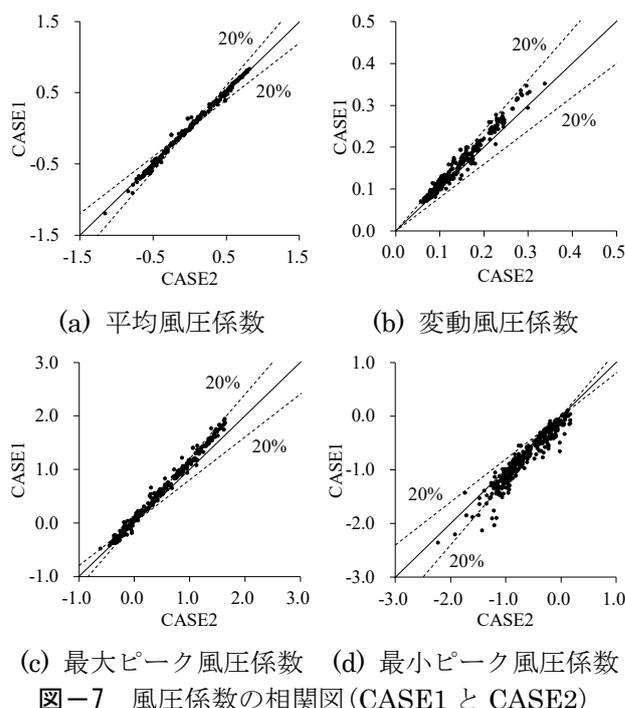


図-8 各階の風圧係数分布(CASE1とCASE2)

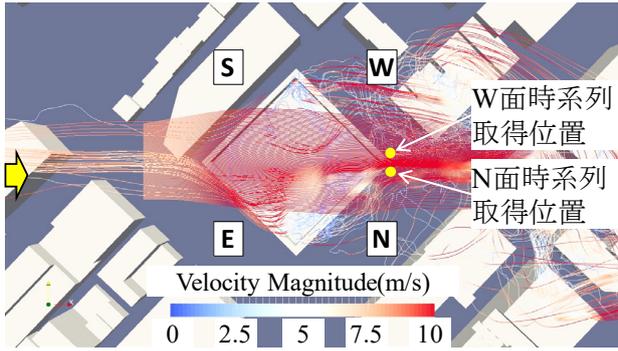


図-9 z=128m 付近での瞬間風速の流線(CASE1)

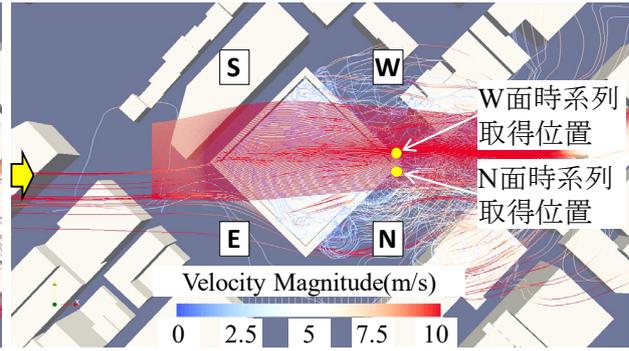


図-12 z=128m 付近での瞬間風速の流線(CASE2)

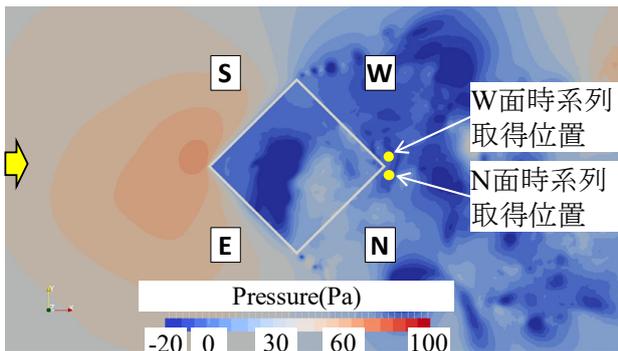


図-10 z=128m での瞬間圧力分布(CASE1)

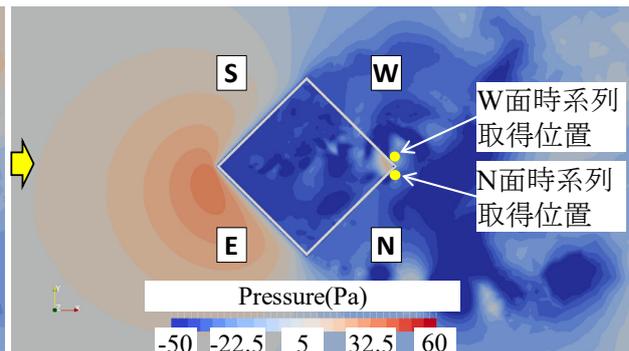
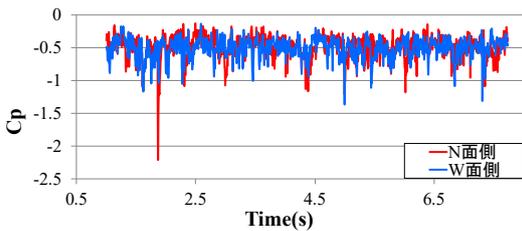
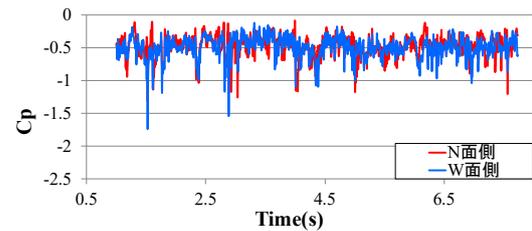


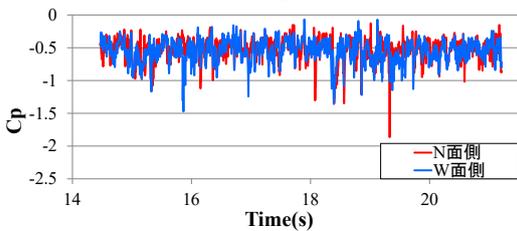
図-13 z=128m での瞬間圧力分布(CASE2)



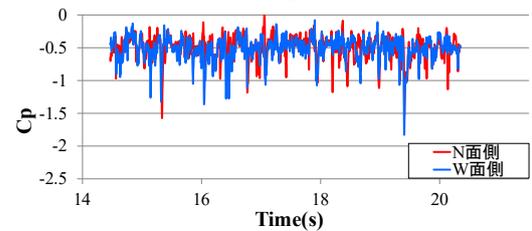
(a) 1 波目



(a) 1 波目



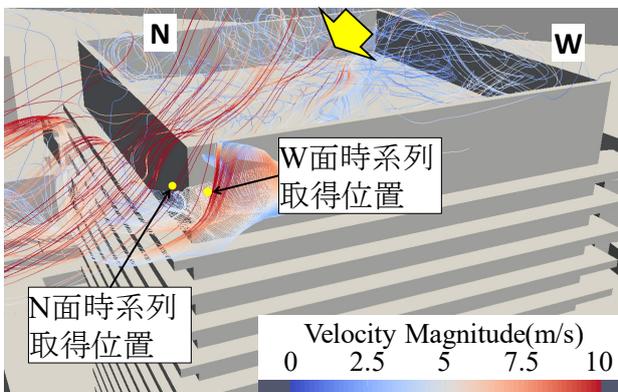
(b) 3 波目



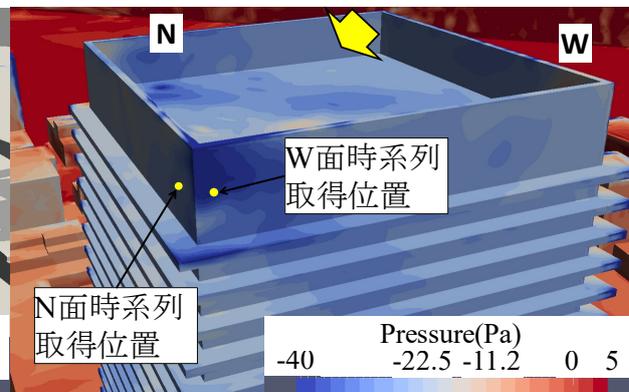
(b) 3 波目

図-11 風下側隅角部の風圧係数の時系列(CASE1)

図-14 風下側隅角部の風圧係数の時系列(CASE2)



(a) 瞬間風速の流線



(b) 瞬間圧力分布

図-15 CASE2 の風下側隅角部の瞬間風速の流線と瞬間圧力分布

とが影響していると考えられる。

- 3) 対象建築物の風上側の格子解像度が接近流の性状に影響を及ぼし、その流れは対象建築物の風上側の隅角部のみではなく、風下側の隅角部のピーク風圧係数にも影響を及ぼす可能性がある。
- 4) 計算負荷を低減した LES では、風圧係数の変動値やピーク値が過小評価となる可能性があるが、対象建築物の風上側や隅角部の格子解像度に配慮することで風荷重評価に適用できると考えられる。

謝辞

本研究は平成 28 年度「建築基準整備促進事業 S18」の一環として実施された。本研究の数値流体計算の成果は、理化学研究所の「京」コンピュータ平成 28 年度 HPCI システム利用研究課題 (hp160144, hp170085) を利用して得られた。ここに記して謝意を表する。

<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”, Vol.78, No.687, pp.913-921, 2013
- 2) 野津剛, 菊池浩利, 日比一喜: “中層市街地に建つ高層建物の LES による壁面風圧評価”, 第 21 回風工学シンポジウム論文集, pp.293-298, 2010
- 3) ファムバンフック, 野津剛, 菊池浩利, 日比一喜, 田村幸雄: “中層実市街地に置かれた高層建物の LES の CSM による風圧評価”, 第 24 回風工学シンポジウム論文集, pp.241-246, 2016
- 4) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説(2015), 2015
- 5) 日本建築学会, 建築物荷重指針を活かす設計資料 2 —建築物の風応答・風荷重評価/CFD 適用ガイド—, 2017
- 6) 扶間貴雅, 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論文集, pp.283-288, 2014
- 7) 河合英徳, 田村哲郎, 近藤宏二, 野津剛, ラフルバレ, 大西慶治, 坪倉誠: “BCM-LES による建物周りの圧力場・流れ場解析”, 第 24 回風工学シンポジウム論文集, pp.247-252, 2016
- 8) 酒井佑樹, 野津剛, 伊藤嘉晃, 田村哲郎: “複雑表面形状を有する高層建築物の隅角部の風荷重評価のための LES”, 第 25 回風工学シンポジウム論文集, pp.241-246, 2018
- 9) Ito, Y., Kawai, H., Sakai, Y., Tamura, T.: “Validation of cladding wind load evaluation of a precisely modelled high-rise building using Large Eddy Simulation”, The 7th International Symposium on Computational Wind Engineering 2018, 2018
- 10) Sakai, Y., Ito, Y., Nozu, T., Tamura, T., Kawai, H.: “LES for Cladding Wind Pressure Evaluation of High-rise Buildings with Precisely Modeled Surrounding Buildings”, The 7th International Symposium on Computational Wind Engineering 2018, 2018
- 11) Sakai, Y., Ito, Y., Nozu, T., Tamura, T.: “Wind load evaluation of high-rise building representing surrounding structures by simple or precise model”, The 15th International Conference on Wind Engineering, pp.581-582, 2019
- 12) 酒井佑樹, 野津剛, 田村哲郎, 河合英徳: “実建築物を対象とした LES の耐風設計への適用性検証”, 第 31 回数値流体力学シンポジウム, 2017
- 13) 酒井佑樹, 野津剛, 田村哲郎, 河合英徳: “大規模 LES による高層建築物の風荷重評価”, 計算工学講演会論文集, Vol.23, 2018
- 14) Nozu, Y., Tamura, T., Kishida, T., Katsumura, A.: “Mesh-adaptive LES for wind load estimation of a high-rise building in a city”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 144, pp.62-69, 2015
- 15) N. Jarrin, R. Prosser, J.-C. Uribe, S. Benhamadouche, D. Laurence: “Reconstruction of turbulent fluctuations for hybrid RANS/LES simulations using a Synthetic-Eddy Method”, International Journal of Heat and Fluid Flow, pp.435-442, 2009
- 16) 田村哲郎, 近藤宏二, 片岡浩人, 河合英徳: “数値流体計算による実建築物の風荷重評価”, 第 24 回風工学シンポジウム論文集, pp.253-258, 2016