

# 数値風洞「エアロダイナ<sup>®</sup>」による市街地における 複雑形状建物の風荷重の予測

小野 佳之 榎木 康太

## Prediction of Wind Load for Realistic Structure in Urban Area Using Computational Wind Tunnel Aerodynamics

Yoshiyuki Ono Kota Enoki

### Abstract

Recent advances in computer performance have made it possible to carry out simulations of the wind flows around buildings more easily than before. Descriptions of computational fluid dynamics (CFD)-based wind load prediction methods appeared for the first time in the “Recommendations for Loads on Buildings (2015, AIJ).” However, thus far, few simulations have been conducted for the flows around buildings with uneven surfaces, such as high-rise buildings with balconies. Therefore, even the applicability of CFD to the predictions of the maximum values for all of the wind directions is yet to be clarified. In this paper, CFD methods using an unstructured grid system and immersed boundary method are applied to the flow around a high-rise building with balconies, and the simulation results are validated by comparing them to the results of experiments.

### 概要

集合住宅など複雑形状建物の風荷重を予測する上での流体計算の適用性の検討を行った。近年、計算機性能の向上に伴い、風洞実験の代替となる方法として、コンピュータを用いて風の流れを予測する流体計算の適用が期待されており、今年改定された日本建築学会・建築物荷重指針・同解説（2015）に、風洞実験と同様に流体計算による評価法について記載された。一方、実建物の複雑な形状の扱いや、多風向の解析による全風向の最大値に関する流体計算の適用性は一般に、明らかとはなっていない。本報では、複雑な形状を扱う非構造格子による解析手法と、複雑細部形状を簡易モデル化した構造格子による解析手法により、集合住宅まわりの流れ解析を実施した。その結果、非構造格子による解析手法の風荷重を予測する上での適用性、および構造格子による解析手法の全風向最大値を予測する上での適用性が確認された。

## 1. はじめに

高層建物の風揺れや、壁面・屋根面への風圧の作用など、これまで、構造物の耐風安全性に関する評価は風洞実験により行われてきた。一方、近年の計算機性能の向上に伴い、数値流体計算の適用が進められており、今年改定された日本建築学会・建築物荷重指針・同解説（2015）<sup>1)</sup>に、風洞実験と同様に流体計算による評価法が記載された。

ただし、これまでの風洞実験を模擬した数値風洞の適用事例は、比較的単純な建物形状を対象としたものが多く、たとえば集合住宅のバルコニーなど建物表面の細かい形状をモデル化し、検証を行った例は少ない。また、風向を限定しているため、実用問題で必要となる全風向での最大値についての流体計算の適用性は十分には明らかとはなっていない。

本報では、集合住宅のバルコニーなどの複雑形状を取り扱う解析手法の風荷重を予測する上での適用性を示すことを目的とする。まず、バルコニーを実験模型と同様にモデル化可能な非構造格子によるLES手法を構築する。解析結

果と風洞実験結果との比較を行い、複雑形状に対する非構造格子による解析手法の適用性を示す。

一方、近年、並列計算機の普及に伴い、同時に多ケースの計算結果が得られるようになってきた。しかしながら、非構造格子を用いた場合、周辺建物の形状修正や風向毎の格子生成に手間を要し、一般に多風向の解析容易ではない。

そこで、バルコニーを簡易モデル化（細部の風荷重は適用外）した構造格子による解析手法を構築し、同時多風向解析により、全風向最大の風荷重に関して実験結果との比較を行い、解析モデルの精度検証を行った結果を示す。

## 2. 数値風洞の概要

格子の配置に自由度がある非構造格子および、格子が規則的に並んだ構造格子によるLES解析手法について説明する。また、少ない格子点でバルコニーを簡易モデル化する方法について述べる。

### 2.1 計算手法

流体の支配方程式は非圧縮性のNavier-Stokes方程式と

連続の式である。計算アルゴリズムは、Fractional Step法に基づく。

非構造格子のケースでは物理量は節点中心に配置し、有限体積法に基づき、離散化を行う。時間積分は、Crank-Nicolson法、空間微分は二次精度の中心差分とする。対流項には中心差分に二階微分の数値粘性項の1%を加える。乱流モデルは、壁面での減衰関数を必要としないCoherent Structure Smagorinsky Mmodel<sup>2)</sup>を採用し、壁面境界条件は二層モデルとする。なお、セル界面の法線ベクトルと隣接点間のベクトルが一致しない場合の二階微分項の直交化補正を、グリーンガウス法で行う。

構造格子のケースでは、物理量をコントロールボリューム中心に配置し、有限体積法で離散化を行う。時間積分は、対流項に三次精度のRunge-Kutta法を、粘性項には、Crank-Nicolson法を用いる。空間微分は二次精度の中心差分とし、対流項には高精度の補間法を用いた。さらに、剥離点付近の数値不安定性を除去する為に小さな数値粘性を加える<sup>3)</sup>。乱流モデルは、Dynamic-Mixedモデル<sup>4)</sup>を用いる。

流入境界条件は、文献5で示している（地表面粗度区分Ⅲ相当）の変動流入風を用いる。

### 2.2 バルコニーの簡易モデル化

構造格子におけるバルコニーは、Goldsteinら<sup>5)</sup>が提案しているIBM (Immersed Boundary Method) を用い、表面で指定する速度となるように外力を加える。すなわち、支配方程式であるNavier-Stokes方程式において、バルコニーの位置のコントロールボリュームに外力項 $f_i$ を加え、速度をゼロとする。

$$f_i(x_s, t) = \alpha \int_0^t u_i(x_{j,s}, t') dt' + \beta u_i(x_{j,s}, t) \quad (1)$$

$t$ は無次元時間、 $u_i$ は外力を与える格子点の風速である。

この方法は、物体の影響を取り入れる際に、少ない格子点でも不安定になりにくいというメリットがある。 $\alpha, \beta$ は収束性を調整するパラメータで、 $\alpha = -2000, \beta = -30$ を用いた。

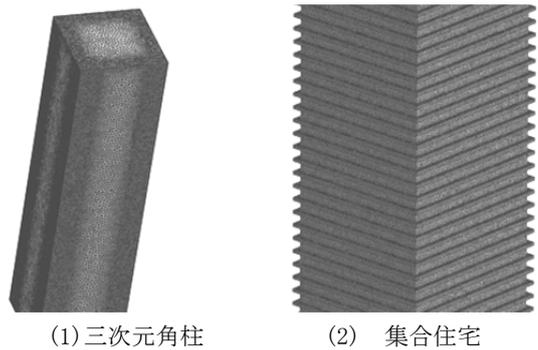
### 3. 解析モデル

解析モデルは、アスペクト比4の三次元角柱<sup>5)</sup>、および辺長比B/Dが約1.09、アスペクト比が約3.3Dの集合住宅モデルであり、低層部、屋上部分、およびバルコニーを除くと、矩形形状の建物である (Fig. 1)。バルコニーは実験において床面のみ模型化（奥行き0.04D程度を約40階分）されており、解析でも同様にモデル化を行った。風圧の測定点は壁面のみ設定されている。

周辺には、南方向近傍に約100mの集合住宅が隣接しており、また、西方向には50m程度の建物が複数連立している (Fig. 2)。

非構造格子のケースでは、単独に建つモデル（三次元角柱、集合住宅）を対象とした。

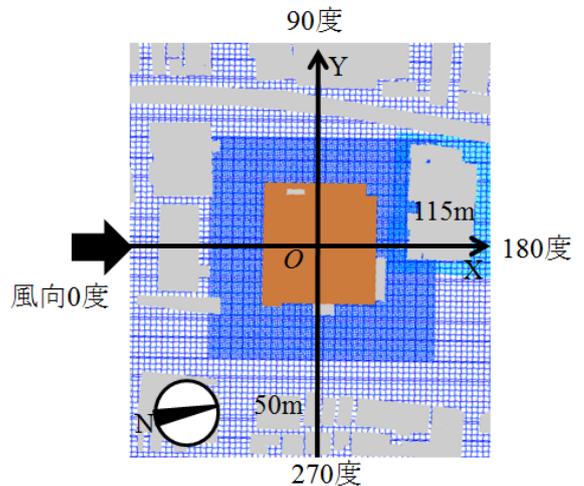
格子形状はテトラメッシュを基本とし、壁面近傍にのみ



(1) 三次元角柱 (2) 集合住宅

Fig. 1 解析モデル (非構造格子)

Computational Model (Unstructured Grid System)



対象建物および街区

Fig. 2 解析モデル (構造格子)

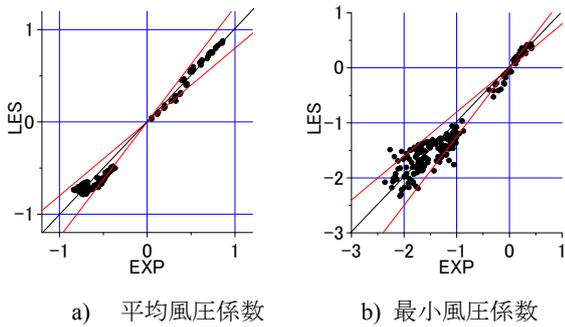
Computational Model (Structured Grid System)



©2015 ZENRIN CO.LTD. (Z09KA第039号)

Fig. 3 計算格子 (構造格子)

Computational Mesh (Structured Grid System)

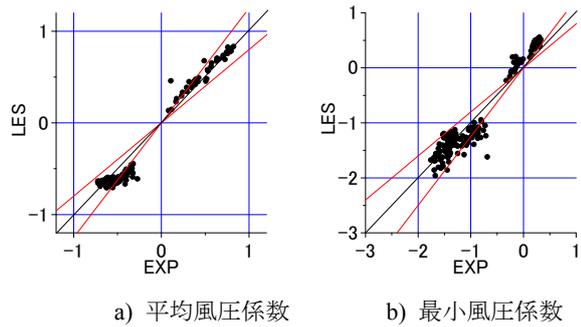


a) 平均風圧係数      b) 最小風圧係数

EXPは実験結果，LESは解析結果，赤線は、ばらつき20%のライン

Fig. 4 風圧係数の比較（三次元角柱）

Comparison of Pressure Coefficients (3D-Square)



a) 平均風圧係数      b) 最小風圧係数

Fig. 5 風圧係数の比較（バルコニー付き集合住宅）

Comparison of Pressure Coefficients (Building with Balconies)

3層のプリズムメッシュを導入した。計算に用いた格子の節点数は三次元角柱では約98万点，バルコニー床面をモデル化した集合住宅では603万点であり，コントロールボリュームは各節点の周りの多面体で構成されている。

構造格子のケースでは，周辺建物を取り入れた集合住宅を対象とし，並列計算機により，18風向の同時計算を行う。ただし，バルコニーの簡易モデル化の効果を検証するため単独のケースも1風向のみ計算を実施した。

計算格子は，流入風を作成した格子と，対象建物を中心とし1kmの範囲を格子幅10m，500mを5m，250mを2.5m，100mを1mとし，さらに隣接建物を中心に約50mの範囲を格子1mとした6種類の格子を用いた（Fig. 3）。総格子点数は約650万点である。

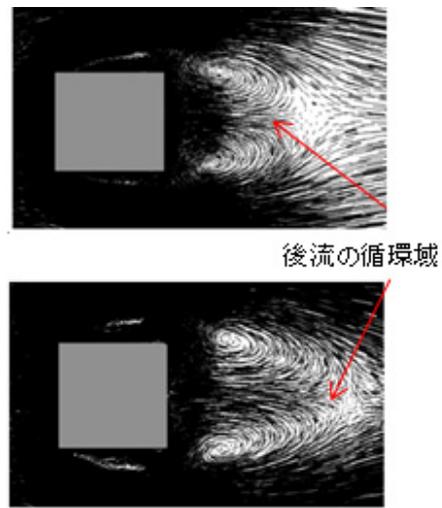
なお，三次元角柱，およびバルコニー付集合住宅を対象とした風洞実験は，大林組技術研究所所有の回流式風洞で行った。風速は頂部高さで10m/sとし，風圧のサンプリング周波数は1000Hz，気流は，1/5勾配流（地表面粗度区分Ⅲ）である。

#### 4. 計算結果

非構造格子を用いた解析手法の精度を検証するため，単独に建つ三次元角柱およびバルコニー形状をモデル化した集合住宅の風圧特性について，風洞実験結果との比較を行う。また，計算結果に基づき，バルコニーが付くことによる，集合住宅まわりの流れの影響について，基本特性の把握を行う。

##### 4.1 風圧係数の比較

Fig. 4, Fig. 5に単独に建つ三次元角柱，およびバルコニー付き集合住宅の平均風圧係数と最小風圧係数の解析結果と実験結果の比較を示す。最小風圧係数は，実時間1秒相当の移動平均を施し，実験では10分相当5波（三次元角柱は4波）のピーク値を求め，アンサンブル平均を施したものの，解析では1波のデータである（ただし，解析の集合住宅のケースは実時間5分間相当の1波）。図中のEXPは実験結果，LESは解析結果を示す。



上：バルコニー付き集合住宅      下：三次元角柱

Fig. 6 速度ベクトル図

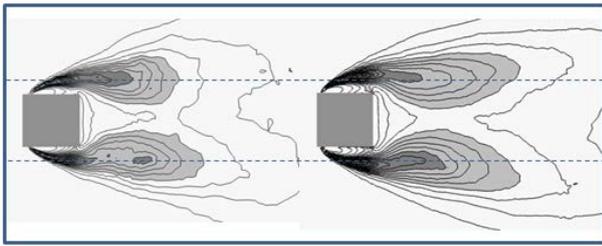
Velocity Vectors

三次元角柱のケースでは，平均風速，最小風圧係数ともに解析結果と実験結果は良い対応が得られていることが確認できる。バルコニー付き集合住宅のケースも，若干解析結果の絶対値が大きくなっているが，平均風圧係数，最小風圧係数ともに対応している。今後，さらに評価時間や格子解像度の向上により改善されるものと考えられる。

##### 4.2 風圧特性へのバルコニーの影響

Fig. 4と Fig. 5における負圧レベルを比較すると，三次元角柱のケースと比べて，バルコニー付き集合住宅のケースは，平均，最小ともに，全体として負圧レベルが小さくなっている。このバルコニーを付加した際の負圧が回復する傾向は，既往の実験結果<sup>6)</sup>と同様である。

Fig. 6, Fig. 7にバルコニー付き集合住宅と，三次元角柱の中央高さにおける平均速度ベクトル図，主流方向風速変動 $\langle u'u' \rangle$ のコンター図を示す。バルコニー付き集合住宅のケースは，角柱と比較して後流の循環域が小さく，また， $\langle u'u' \rangle$ の分布では，側面後縁付近における剥離せん断層が



バルコニー付き集合住宅      三次元角柱  
Fig. 7 風速変動  $\langle u'u' \rangle$  のコンター図  
Contours of  $\langle u'u' \rangle$

側面に近づいている。すなわち、バルコニーの影響を受けるとせん断層が再付着しやすくなり、後端の影響を受けた小さな後流渦の放出が頻発しているものと考えられる。Fig. 8に渦度 $\omega_z$ の等値面図を示す。Fig. 9にバルコニー付き集合住宅近傍の速度ベクトル図を示す。バルコニー付き集合住宅のケースは、剥離位置が鉛直方向にずれ、 $\omega_z$ の分布がバルコニーの凹凸に応じて鉛直方向に変化している。この剥離域の三次元的な流れ構造が $\omega_z$ に対して鉛直方向に一樣に強く維持することを阻害し、側面の負圧レベルが小さくなっているものと考えられる。

一方、前面では、上下のバルコニーの間に循環が生じている。前面上部では流れが上向きに接近するためバルコニーの下面に流れが当たり下面付近の正圧が、下部領域では流れが下向きに作用するためバルコニー上面に流れが当たり上面付近の正圧が大きくなっている。

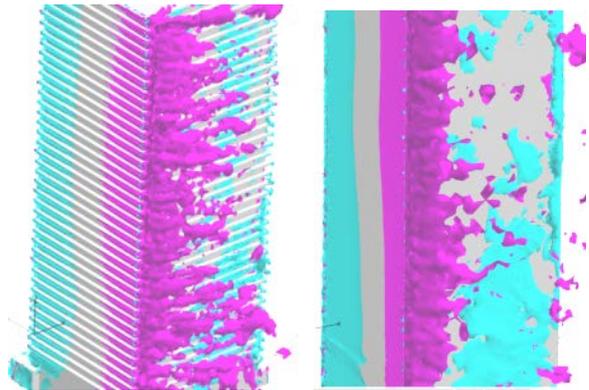
以上のように非構造格子により、バルコニーを実験模型と同様にモデル化することでバルコニーまわりの細かい流れを捉えることができる。一方、構造格子では格子の生成が容易で有り、一般に少ない格子点数で精度が得られるという利点がある。次節では、バルコニーをIBMにより簡易モデルした構造格子を用いた解析手法により、全風向最大値の予測精度を検証する。

#### 4.3 バルコニーの簡易モデル化IBMの検証

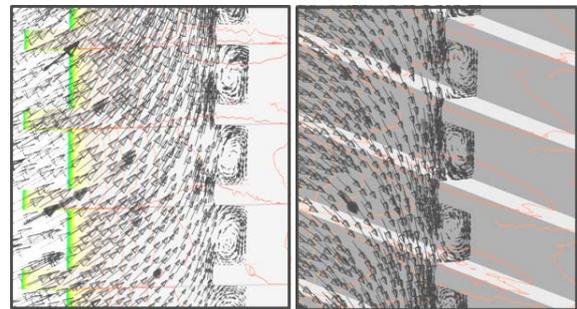
バルコニーを簡易モデル化した構造格子ケースについて、単独に建つ際の精度の検証を行った上で、周辺建物を考慮した18風向の解析を行う。全風向の最大値を評価する上での解析手法の適用性の検証を行う。なお、ピーク値は実時間1秒相当の移動平均を施し、実験は10分相当5波のピーク値を求め、アンサンブル平均を施したデータ、解析では1波のデータである。

まず、バルコニーの簡易モデル化法の妥当性を検証するために、Fig. 10に単独時におけるピーク風圧係数の実験結果と解析結果(1):IBMなし、(2):IBMの比較を示す。IBMを用いない場合、解析では負圧レベルが-2を超える大きな値が認められる。一方、IBMを用いると、大きな負圧は認められず、ほぼ45度の線分上に沿った分布となっており、バルコニーにより剥離性状が変化し、負圧レベルが低減する傾向が再現されていることが判る。

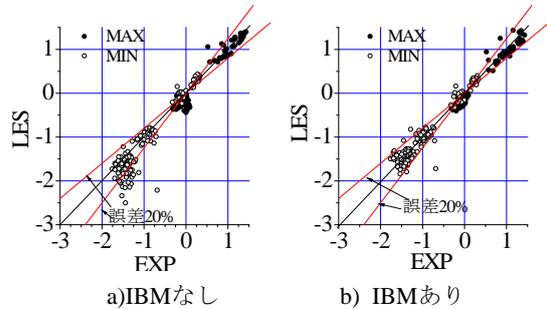
なお、IBMを用いて少ない格子点でバルコニーをモデル



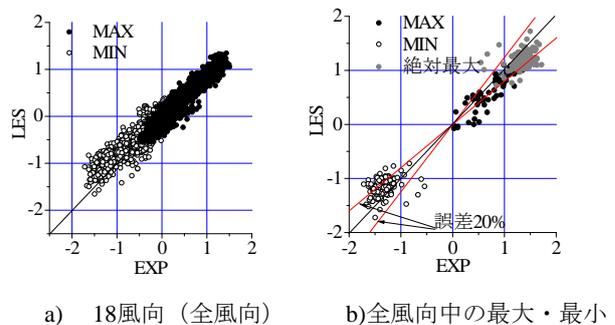
バルコニー付き集合住宅      三次元角柱  
Fig. 8 渦度( $\omega_z$ )の等値面図(瞬間場)  
Iso-Surface of Instantaneous Vorticity ( $\omega_z$ )



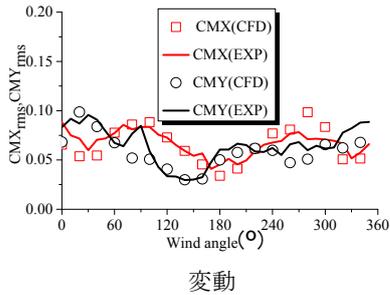
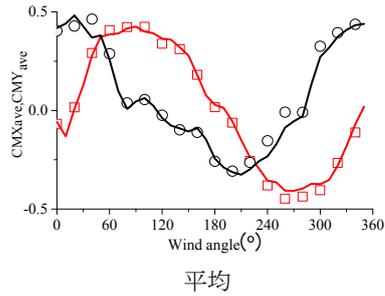
(左:上部領域, 右:下部領域)  
前面中心線面のxz方向ベクトル  
Fig. 9 風速のベクトル図(瞬間場)  
Instantaneous Velocity Vectors



a) IBMなし      b) IBMあり  
Fig. 10 ピーク風圧係数の比較(単独)  
Comparison of Peak Pressure (Single)



a) 18風向(全風向)      b) 全風向中の最大・最小  
Fig. 11 ピーク風圧係数の比較(周辺あり, 18風向)  
Comparison of Peak Pressure



CMx, CMy : x軸, y軸まわりのモーメント係数  
 Fig. 12 モーメント係数の比較 (周辺あり)  
 Comparison of Moment Coefficients

化する場合、バルコニー自体に作用する風圧の予測精度は十分ではない。ここでは、実験で測定した集合住宅の壁面の風圧を比較している。

#### 4.4 簡易モデル化方法による18風向最大値の予測精度の検証

Fig. 11に、周辺建物を考慮した際の、18風向における実験結果と解析結果(測定点160点×18風向=1280点)の最大風圧係数、最小風圧係数の比較、および各測定点における最大風圧係数、最小風圧係数の全18風向中の最大、最小、絶対最大値の実験結果との比較を示す。18風向全ての風向の最大風圧係数、最小風圧係数を比較すると、-1~1程度の範囲において、ばらつきが認められるが、全風向中の最大値に着目すると、おおよそ20%の誤差の範囲と入っている。すなわち、全風向最大となる大きな風圧レベルに関しては、良い対応が見られることが判る。なお、解析では1波(実験では5波の平均)の結果であり、解析時間を増やし、アンサンブル平均を行うことでさらに良い対応が得られるものと考えられる。

次に、構造物全体に作用する風力について、検証を行う。Fig. 12に平均および変動モーメント係数(CMx, CMyは:x軸, y軸まわりのモーメント係数)の実験結果と解析結果の比較を示す。風向毎の平均モーメント係数の分布は、CMy(CMx)が20度(80度)付近で最大、200度(260度)付近で最小となる傾向や定量的にも良く対応していることが確認できる。変動モーメント係数についても、風向によってばらつきが見られるものの、平均モーメント係数が大きな風向における変動モーメント係数は、実験結果と解析結果で対応している。

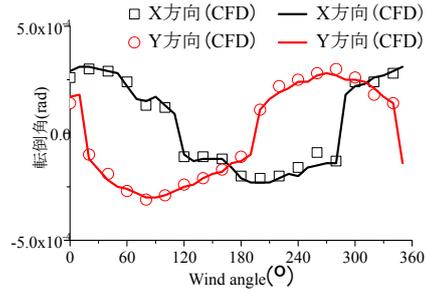
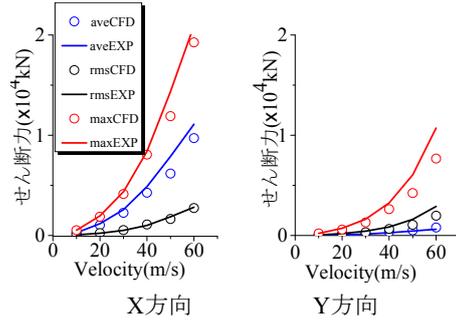
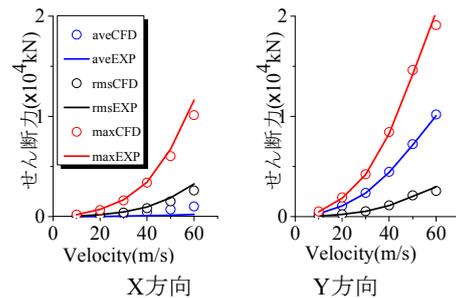


Fig. 13 転倒角の比較  
 Comparison of Overturning Angle



a) X方向の転倒角が最大となる風向



b) Y方向の転倒角が最大となる風向

Fig. 14 風速レベルによるせん断力の比較  
 Comparison of Shear Force versus Velocity Level

続いて、一般的な集合住宅として、質量を $8 \times 10^4$ ton、固有周期を2.5秒、減衰定数を2%と設定し、スペクトルモーダル法により、頂部高さの風速10~60m/sにおける転倒角を算出した。Fig. 13に、頂部高さの風速が50m/sのケースの風向毎の転倒角の分布を示す。ここに転倒角とは、建物基礎の地表面に対する回転角である。実験結果と解析結果は対応しており、X方向の転倒角が最大となるのは風向20度、Y方向は80度である。

Fig. 14に各風速における、X方向、Y方向の転倒角が最大となる風向におけるせん断力の分布を示す。

X方向(Y方向)の転倒角の最大となる風向では、Y方向(X方向)の分布に若干ばらつきがあるが、絶対値が大きなX方向(Y方向)のせん断力の分布に関しては、解析と実験結果で良く対応していることが確認できる。

Fig. 15に示すように、Y方向の転倒角が最大となる風向20度では、風上で剥がれた流れが、後方の隣接建物にあた

り回り込み風下面全体として、負圧レベルおよび変動が大きくなり、平均および変動風力が増大している。

## 5. 結論

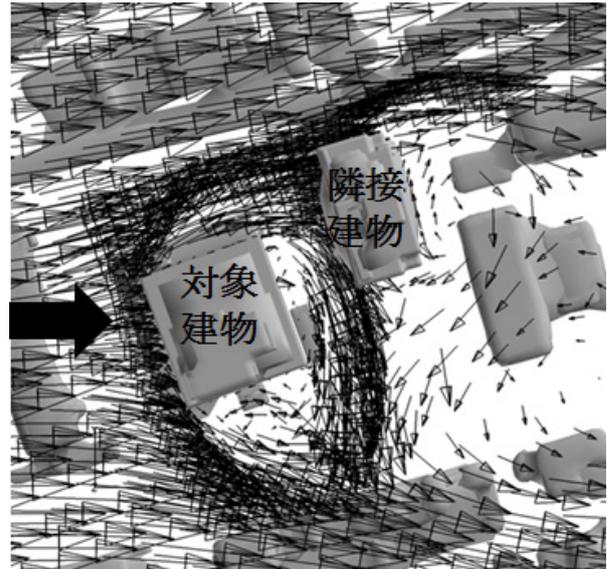
集合住宅のバルコニーを実験模型と同様に再現した非構造格子による解析手法と、バルコニーを簡易モデル化した構造格子による解析手法により、集合住宅まわりの流れのLES解析を実施した。風洞実験結果との比較を行い、複雑形状に対する両解析手法の適用性の検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 非構造格子によるLES解手法により基本問題である三次元角柱、および単独に建つバルコニー付き集合住宅まわりの流れ解析を行った。風圧特性に関して、風洞実験結果と比較を行った結果、良い対応が得られることを確認した。
- 2) IBMによりバルコニーを簡易モデル化し構造格子を用いて、18風向におけるLES解析を実施した。街区に建つバルコニー付き集合住宅の風荷重に関して、全風向最大時の値に着目し、風洞実験結果と比較を行った結果、各風向を比較する場合に比べて、良い対応が見られた。

2015年3月にSX-ACEが導入され、従来に比べて高速に、多風向の結果が得られるようになった。一方、計算モデルや非構造格子の作成は時間を要し、計算時間を上回る時代になりつつある。非構造格子を用いて実建物形状を正確にモデル化した大規模計算が期待される一方で、格子生成に手間を掛けずに、構造格子による迅速なケーススタディも重要であり、両者を上手く組み合わせ、耐風設計に生かしていく予定である。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015
- 2) Kobayashi, H. : The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulent



©2015 ZENRIN CO.,LTD. (Z09KA第039号)

Fig. 15 平均風速ベクトル図 (20度)

Time-Averaged Velocity Vectors

- channel flow, *Phys. Fluids*, 17, 045104, 2005
- 3) Ono, Y., Tamura, T.: Large eddy simulation using a curvilinear coordinate system for the flow around a square cylinder, *Wind & Structure*, Vol.5, No.2, pp.369-378, 2002
- 4) Zang, Y, Street, R. L, Koseff, J. R. : A dynamic mixed subgrid-scale model and its application to turbulent recirculating flows, *Phys. Fluids, A* Vol.5, Nov.12, pp. 3186-3196, 1993
- 5) Goldstein, D, Handler, R, and Sirovich, L. : Modeling a No-Slip Flow Boundary with an External Force Field, *J. Comp. Phys.*, **105**, pp. 354-366, 1993
- 6) 高森 浩治, 西村 宏昭 : 凹凸のある建物の風圧分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1061-1062, 1993