

# EFD/CFD の活用による建物近傍流れ場の解明

ファムバンフック, 野津剛, 菊池浩利, 日比一喜  
清水建設株式会社技術研究所

## Wind Flow around a Building using EFD and CFD

by  
Pham Van PHUC, Tsuyoshi NOZU, Hiroto KIKUCHI, Kazuki HIBI

### ABSTRACT

A wind tunnel test and numerical simulation are carried out for a building model with a setback. High positive peak and low negative peak pressures are observed experimentally on roofs and walls of this building in dominant local pressure zones. Large scale simulations using LES are carried out for meshes in different resolutions to clarify the phenomena. A 30m long computational domain is constructed to conscientiously model the wind tunnel section including spires, fences and block roughness. Wind speed power spectral densities, pressure coefficients and local pressure distributions show good agreement with experimental results in case of the high mesh resolution, which can reproduce the power spectrum of wind flow in a high frequency region. These results also confirm the high accuracy and reliability of the numerical results as well as experimental results. Based on simulated time-averaged streamlines, the flow pattern around the models are visualized and examined. Conical and horseshoe vortices in the complex three dimensional flows are observed near the dominant local negative pressure zones.

### 1. はじめに

近年、市街地に計画される建物は、敷地や法規等の制約からセットバックなど複雑な形状が多くなる。しかしながら、これらの形状は入隅部付近等に大きな局部風圧が生じており、その発生メカニズムの解明が求められている<sup>1)</sup>。風洞実験（以下、EFD: Experimental Fluid Dynamics と称する）では風圧実験などの実施により建物に作用する局部風圧を特定することができるが、その局部風圧を起因する建物近傍の流れ場の計測及び可視化は難しく、数値流体解析による詳細な評価が期待されている。一方、数値流体解析（以下、CFD: Computational Fluid Dynamics と称する）は解析モデルや乱流モデル、計算格子の空間解像度及び解析手法によってその予測精度が変化しており、十分な精度の結果を得られないとそのメカニズムの解明に対して誤解を与える恐れも考えられる。これらの問題を解決するためには EFD 及び CFD の両者の優位性の活用が必要となる。

本研究ではセットバックした基本的な建物形状を対象にして、風圧実験の実施によりその建物の局部風圧を確認する。また、LES 乱流モデルを用いた CFD を行い、実験結果との比較により計算格子の空間解像度による影響及びその建物に作用する局部風圧の予測精度を調べる。さらに、実験で詳細に計測することが困難であるが、解析結果の 3 次元の可視化によりその局部風圧に起因する建物近傍の流れ場を明らかにする。

### 2. 風洞実験(EFD)及び数値流体解析(CFD)の概要

#### 2.1 風洞実験(EFD)

地表面付近の自然風は図 1 に示すように地表面粗度区分によって境界層気流が生成されている。建築分野においては、建物に作用する風荷重等を正確に評価するためにこれらの自然風と相似する境界層流入気流を作成する必要がある。風洞実験では測定部分の風上側に長い助走路を設けて、十分な乱流境界層を得るためのスパイヤー、ラフネスブロック及びフェンス等を風洞床面に配置することによって、想定した気流を作成している。目的の気流粗度及びその配置を選ぶといった試行錯誤により気流の作成方法が確立されている<sup>2)</sup>。本研究では、回流式境界層風洞（幅：3.5m、高さ：2.5m）を用いて、粗区分 III に相当する平均風速の鉛直分布べき指数  $\alpha=1/5$  の流入気流を発生した。図 2(a) は風洞内に配置したスパイヤーとラフネスブロックおよびフェンスの様子を示す。実験気流の乱流特性を調べるために

は熱線流速計を用いた。また、一様流入風速  $U=15\text{m/s}$  を想定して風洞ファンの回転数を制御した。実験の縮尺は  $S=1/250$  である。

対象としたモデルは矩形形状を基本として低層部を付加してセットバックさせた建物である（図 2b, 表 1）。実験は回流式境界層風洞で建物壁面の風圧測定を行い、壁面に正対する風向を 0 度として 5 度ピッチで 72 風向を検討した。また、風圧測定点は左右対称な形状より、表 1 に示す模型片側の領域（屋根面：R1, 2, 壁面：W1, 2）のみとし、336~412 点を屋根・壁面に配置した。実験風速は軒高で  $10.5\text{m/s}$ 、変動風速のサンプリング間隔は  $\Delta t = 0.001$  秒とし、風圧データの導圧チューブの影響は、予め求めたゲインおよびフェイズ特性を用いて補正した。計測データは、実際の基本風速  $36\text{m/s}$  を想定し、軒高の実時間換算で 10 分間相当の記録を 10 サンプル抽出した。ピーク外圧係数は、受圧面積の評価は考慮せず、平均化時間を実時間約 1 秒として移動平均を行い、10 個のアンサンブル平均の結果を示した。

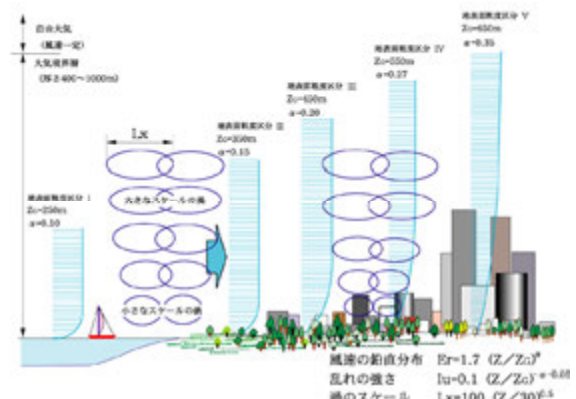
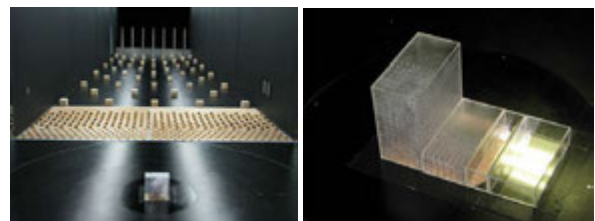


図 1 地表面粗度区分による境界層の生成概要



(a) 風洞内 (b) 実験模型

図 2 風洞内の写真と実験模型

表 1 建物モデルの寸法

モデル	B	D	H	H1	H2	D1 (mm)
SBL3	200	100	200	150	50	350

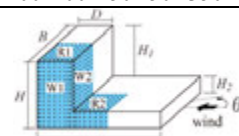
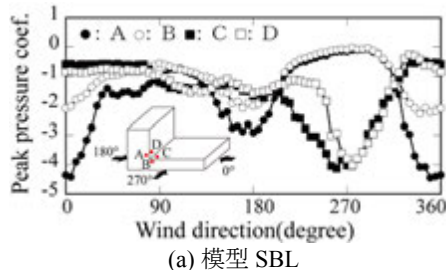



図 3 風向による外圧係数の負側ピーク値の変化

図 3 は入隅部の負側のピーク外圧係数の風向による変化を示した。点 A, B は W1 壁面, 点 C は R2 屋根面, 点 D は W2 壁面の入隅部で最大値が発生した点である。風向 0 度付近で差異が見られ, 点 A で -4 程度, 点 B では -2 程度となり, 2 倍程度も差がある。W1 壁面入隅部では風向 0~10 度または 350~360 度近傍で -4.4 程度の負圧が発生しており, W2 壁面の端部では -4 を超えるピーク外圧係数が風向 270 度付近で発生している。R2 屋根面の端部に作用する最小ピーク外圧係数は 260~280 度の風向で -4 を示している。

## 2. 2 CFDの数値モデルと解析手法

CFD による境界層気流を作成する際には計算負荷を軽減するため, 解析対象領域と別とする準周期境界条件のドライバ部を用いて, 流入気流を作成する方法がよく用いられている<sup>3)</sup>。しかし, 目標とする統計量を満たす流れ場を生成することが難しいといった問題があるが, その流れ場を流入気流として建物に作用する荷重を算出し, 実験結果との比較により CFD による計算精度を評価する。検討結果は流入気流の作成, または使用している解析モデルによる精度は不明である。流れ場のメカニズムの解明という目的で風洞の詳細を再現する必要がある。

本研究では解析領域の長さを 30m として, 風洞実験と同様にスパイヤーとラフネスブロックおよびフェンスを含めた風洞の助走路及び測定部分を忠実に再現した。図 4 には全体の解析領域の概要を示す。検討対象建物にして, 風圧実験から得られた最小ピーク値が発生する風向 350deg に対して解析を行った。境界条件としては建物の軒高  $H$  の風速が 10.5m/s になるように流入境界で  $U_0=15\text{m/s}$  の一様流入風速を与え, 流出境界では自由流出とした。風洞壁面や建物壁面上では no-slip 条件とした。Re 数は  $1.18 \times 10^5$  である。

また, LES (Large Eddy Simulation) 乱流モデルを用い, 標準 Smagorinsky サブグリッドスケールモデルで行った。流体運動を有限体積法により離散化し, 移流項の空間離散化には 2 次精度中心差分, 時間発展には 1 次精度陰解法を用いた。計算時間刻みを  $\Delta t=0.001$  秒とし, 最初の 8 秒は助走計算とし, 軒高の実時間換算で 10 分間の 10 サンプルに相当する 82.2 秒 ( $T=8.22$  秒の 10 波形) を解析時間とした。得られた圧力は平均化時間を実時間約 1 秒として移動平均を行い, 10 個のアンサンブル平均の結果をピーク外圧係数として評価した。計算コードは OpenFOAM<sup>4)</sup> である。

## 3. EFD との比較による CFD の計算精度の検証

CFD は乱流モデルや計算スキーム及び格子の空間解像度などによりその計算精度が大きく変化する。建物に作用する風荷重を評価する際には LES 乱流モデルは有効なモデルとして知られている<sup>3)</sup>。本章では, LES 乱流モデルを用い, 異なる計算格子の利用により CFD の計算精度を評価する。

### 3. 1 CFDの数値モデルと解析手法

計算格子解像度による境界層気流の変化を評価するためには 3 つの格子 (A, B, C) を用いた。図 5 と 6 及び 7 はそれぞれの格子の断面図と格子 B のスパイヤーとフェンス及びラフネスブロック近傍の拡大図である。表 2 はそれぞれの計算格子の間隔を示す。格子作成は Snappy-HexMesh ツール<sup>4)</sup>を採用した。格子 A は水平方向を 25~200mm の間隔, 鉛直方向を 1~200mm の間隔とし, 格子 B は格子 A を細分化した。また, 格子 C は水平方向格子間隔を格子 B の水平方向格子間隔の半分とした。格子 A, B, C の結果の比較により流れ場全体の空間解像度の増加による流入気流の違いを調べる。

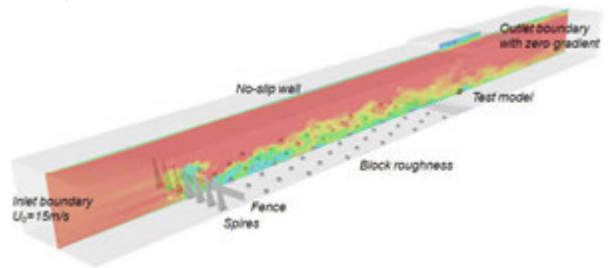
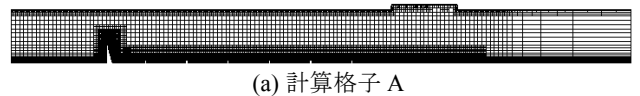
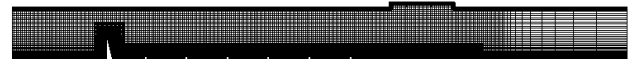


図 4 数値解析モデル



(a) 計算格子 A



(b) 計算格子 B と C

図 5 計算格子の断面図

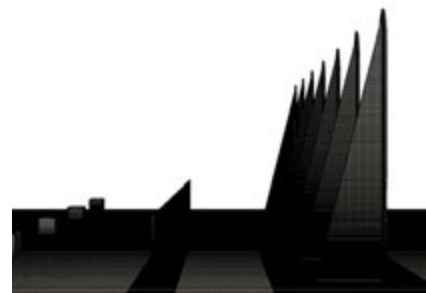


図 6 計算格子 B のスパイヤーとフェンス近傍の拡大図



図 7 計算格子 B のラフネスブロック近傍の拡大図

表 2 計算格子の間隔と格子数

計算格子	水平(mm)	鉛直(mm)	格子数
A	25~200	1~200	300 万
B	12.5~100	0.5~100	3000 万
C	6.25~50	0.5~100	1.2 億

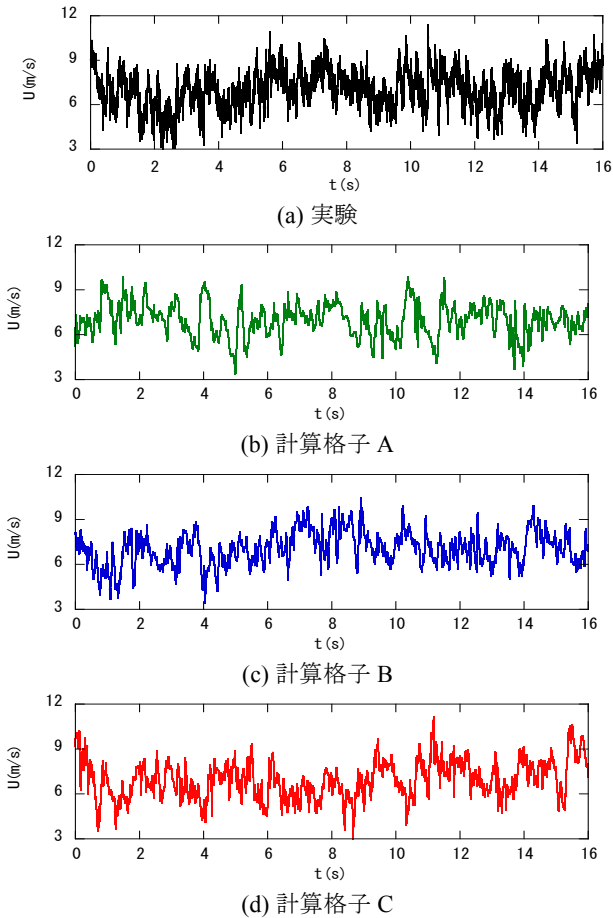


図 8 風速の主流方向成分の時系列の一例

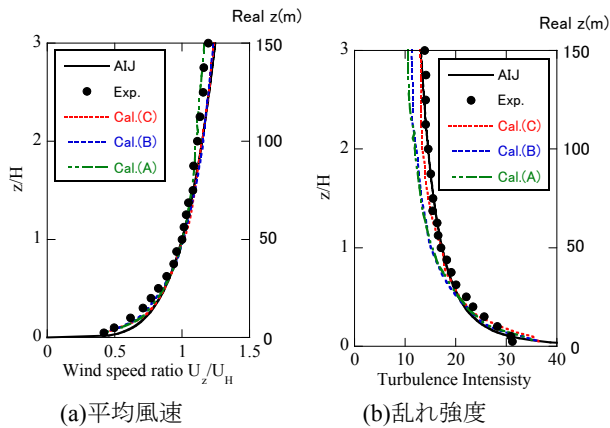


図 9 風速の鉛直分布

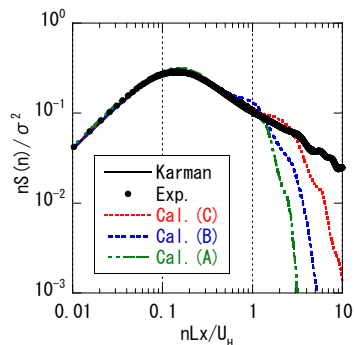


図 10 風速のパワースペクトル密度

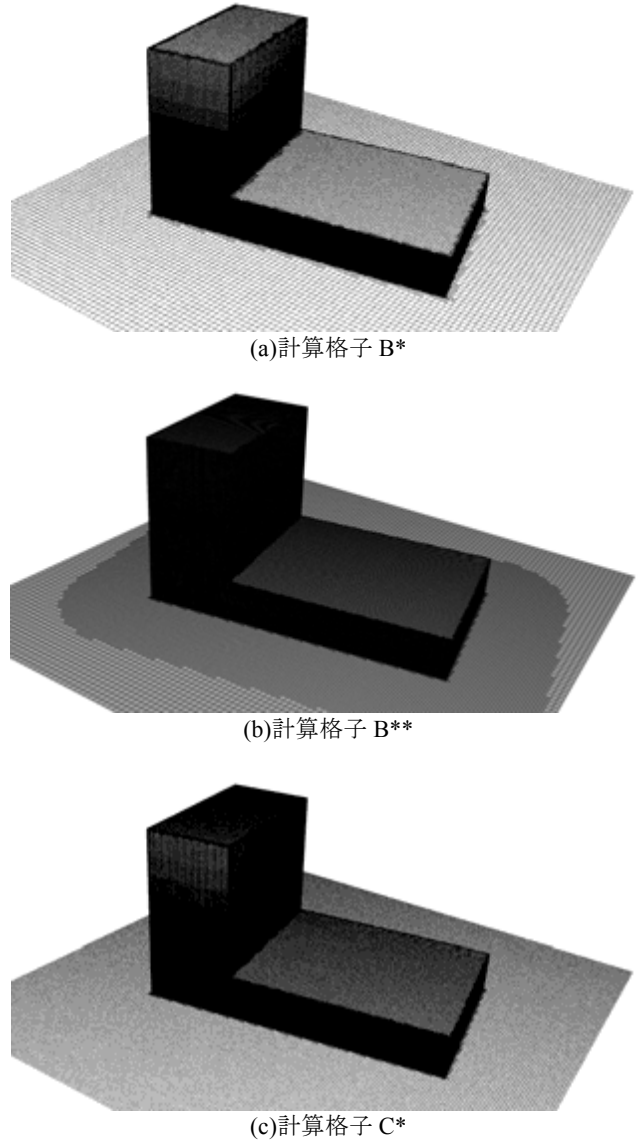


図 11 建物近傍の計算格子

表 3 計算格子の間隔と格子数

計算格子	水平(mm)	鉛直(mm)	格子数
B*	12.5~100	0.5~100	3.3 千万
B**	6.25~100	0.5~100	3.9 千万
C*	6.25~50	0.5~100	1.32 億

B\*\*: 建物近傍の格子のみ細分化

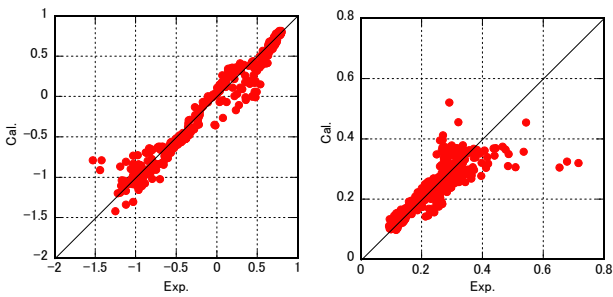
図 8 には測定部中心の上側 1.4m, 高さ H=0.2m にある流入気流の主流方向成分の時系列の一例を示す. 図 9 は平均風速および乱れ強さの鉛直分布を示す. いずれの計算格子における解析結果も建築物荷重指針 AIJ<sup>9)</sup>により定められた値および実験結果とほぼ一致する. 図 10 は主流方向風速変動のパワースペクトル密度と Karman スペクトルとの比較である. 解析結果は実験結果と比べると  $nL_x/U_H=1$  以上の領域において格子 A と格子 B ではパワースペクトル密度は急激に減少しているが, 格子 C では格子解像度の増加によって,  $nL_x/U_H=2$  までの高周波数成分をより良く再現できた. ちなみに, 格子 C は格子 B より空間解像度が 2 倍に高くなり, 高周波数成分の再現領域も 2 倍となることが理解できる.



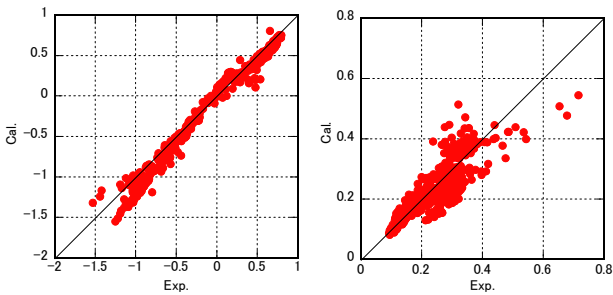
### 3. 2 格子解像度による建物の局部風圧の再現

格子解像度による建物の局部風圧の予測精度を調べるためには前節に示す格子 B, C に基づいて3つの格子 (B\*, B\*\*, C\*) を作成した (図 11) . 表 3 にはこれらの格子の解像度を示す. 格子 B\* は水平解像度 12.5mm ~100mm の間隔とし, 格子 C\* は格子 B\* 全体の水平解像度の半分とした. 一方で, 格子 B\*\* は格子 B\* に基づいて建物周辺のみを細分化した. 本検討は格子 B\* と格子 B\*\* の計算結果の比較により建物近傍の空間解像度の増加による建物の自らから生成する渦の再現性を調べる. 一方で, 格子 B\* または格子 B\*\* と格子 C\* の計算結果の比較により全体空間解像度の増加による流入気流の影響を確認する.

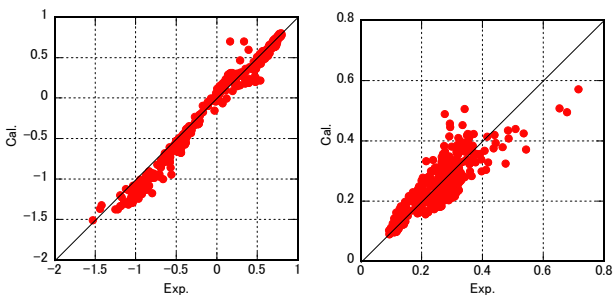
建物表面に作用する外圧係数の平均値と標準偏差の実験値と計算値の相関を図 12 と図 13 に示す. ここで, 計算値は実験模型の 404 点の風圧測定点位置に対応する点の値を算出した. いずれの計算格子についても実験と計算との相関関係を得られるため, 建物に作用する風力 (表面外圧の積分値) に関しては計算結果が実験結果と同等であることが分かる. ただし, 平均値-1 以下及び標準偏差 0.4 以上の外圧係数の領域では格子 A の計算結果でバラツキが大きい傾向が見られる.



(a) 格子 B\*

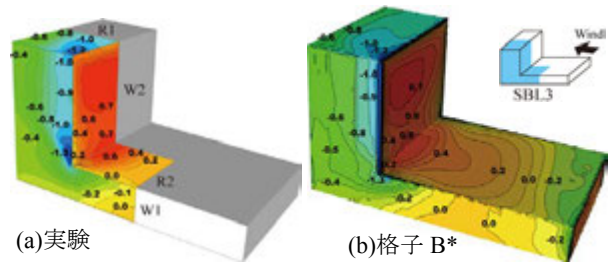


(b) 格子 B\*\*



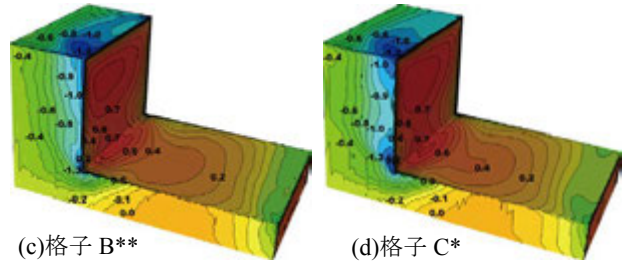
(c) 格子 C\*

図 12 外圧平均値と標準偏差の実験値と計算値の相関



(a) 実験

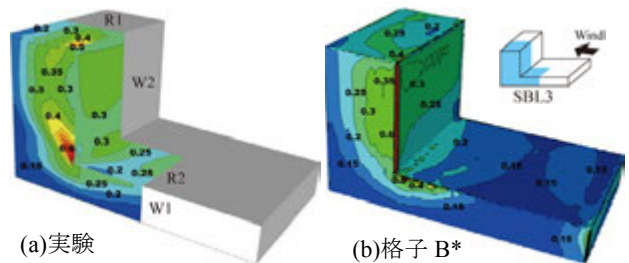
(b) 格子 B\*



(c) 格子 B\*\*

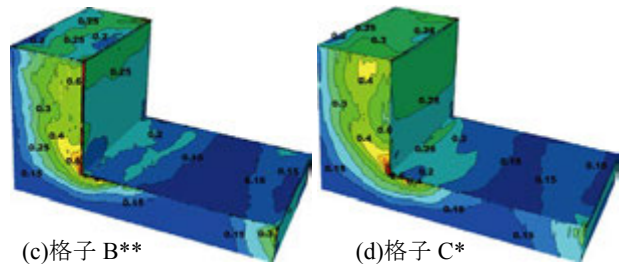
(d) 格子 C\*

図 13 実験と解析の外圧係数の平均値の比較



(a) 実験

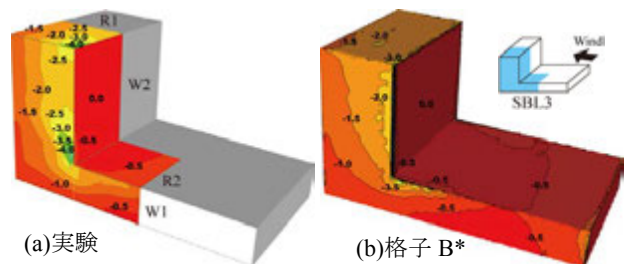
(b) 格子 B\*



(c) 格子 B\*\*

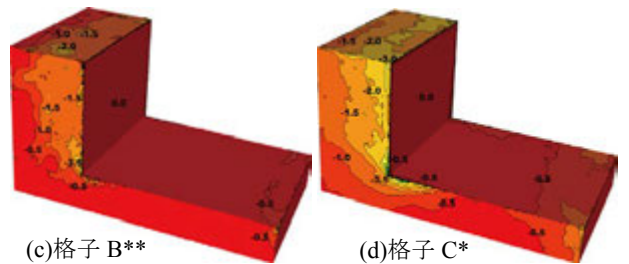
(d) 格子 C\*

図 14 実験と解析の外圧係数の標準偏差の比較



(a) 実験

(b) 格子 B\*



(c) 格子 B\*\*

(d) 格子 C\*

図 15 実験と解析の外圧係数の負側ピーク値の比較

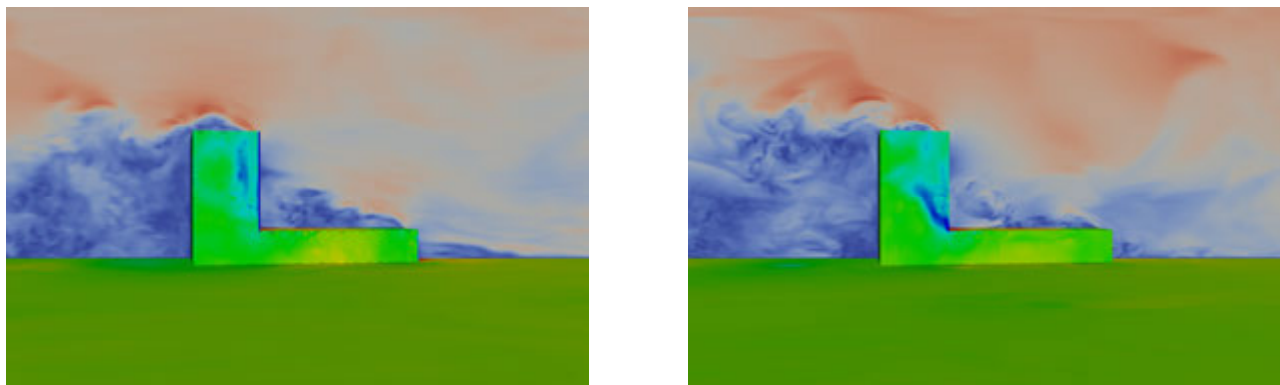
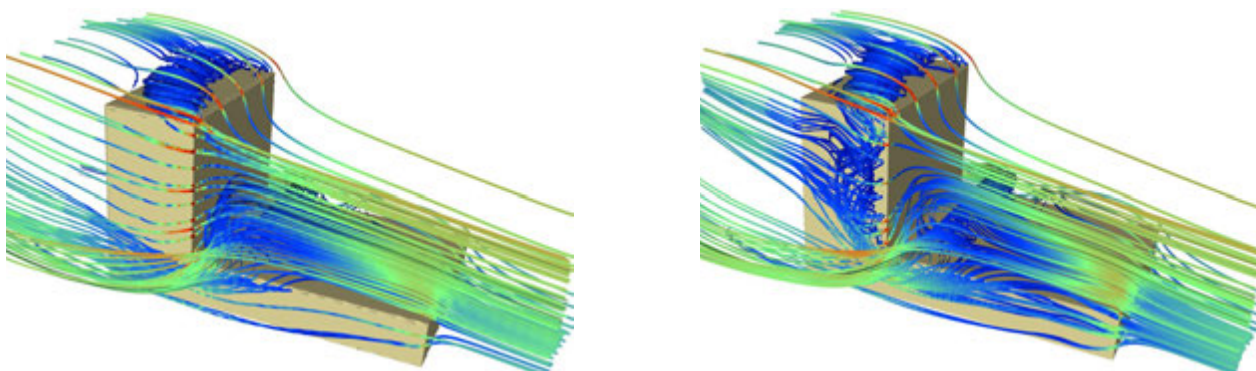
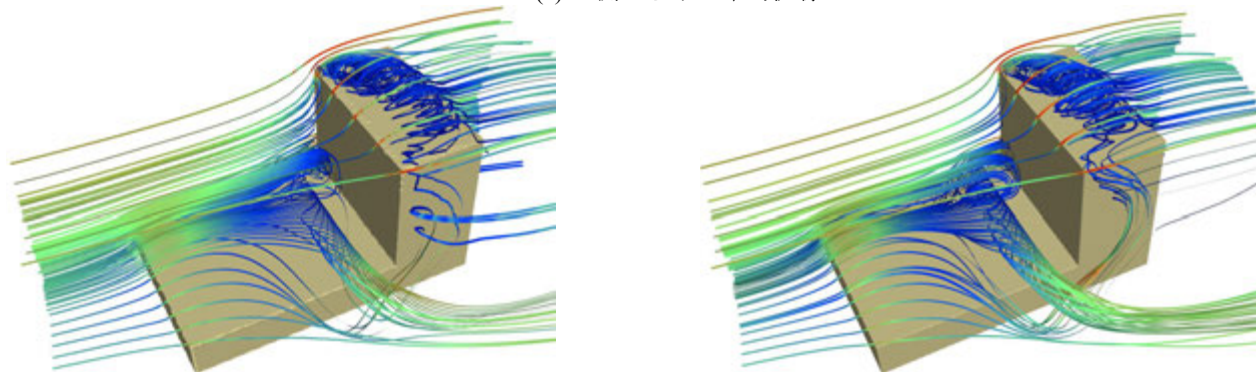


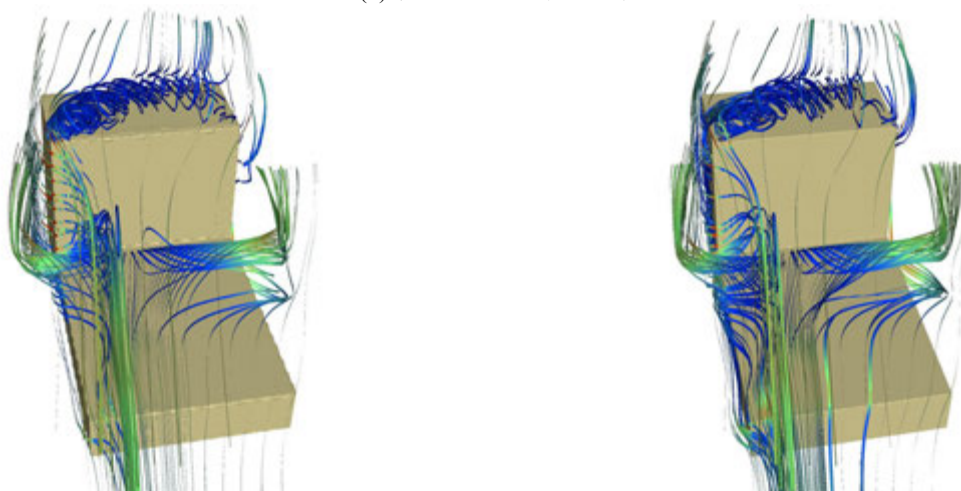
図 16 断面風速と建物壁面の風圧コンターの瞬間場 (左: 格子 B\*, 右: 格子 C\*)



(a) 左側からみた平均流線



(b) 右側からみた平均流線



(c) 正面からみた平均流線

図 17 建物近傍の平均流線 (左: 格子 B\*, 右: 格子 C\*)

図 13 は実験および解析から得られた外圧係数の平均値の比較である。本解析はいずれの計算格子においても風向に概ね正対する壁面で 0.7、高層部屋根面で-1.2の局部負圧が再現され、実験結果と類似した結果となっているが、入隅部付近の側面での-1.3の局部風圧の再現については格子 B\*\*または格子 C\*の高解像度の計算格子を用いる必要のあることが分かった。図 14 と図 15 は実験と解析の外圧係数の標準偏差および負側のピーク値の比較を示す。格子 B\*\*と格子 C\*は入隅部付近の側面で発生した局部風圧の領域を再現できるが、格子 C\*の方が実験結果により近い値となる。これは、格子 C\*が全領域で高解像度化されており、流入気流の高周波数成分の再現による効果と考えられる。

#### 4. CFD による建物近傍流れ場の解明

図 16 は風洞の中央断面の風速コンター及び建物壁面の風圧コンターの瞬間場の一例を示す。格子 B\*と比べて、格子 C\*の方は入隅部付近に局部風圧の発生が良く分かる。図 17 は建物近傍の平均流線を示したものである。高層屋根面については、接近流の風向は風上壁面に対して 10deg 偏っており、風上側の高層屋根面の角部で円錐状の渦が形成されて、両者の格子 B\*, C\*では同様な流れ場を確認できる。入隅部付近については、格子 B\*では、低層屋根面の前縁角で剥離して、高層部からの吹き降しにより低層屋根の入隅部近傍で馬蹄形渦が生じており、その渦が巻き込みながら側面に流れていく。一方、格子 C\*では、入隅部近傍で生じた馬蹄形渦は側面に移流し、高層屋根面に巻き込まれる様子が見られ、局部負圧の発生領域においては、馬蹄形渦と円錐渦の 3 次元的な複雑な流れ場が生じている。

#### 5. 結論

本研究ではセットバックした建物を対象として、風圧実験の実施によりその建物の局部風圧を確認した。また、境界層風洞の助走路及び測定部分を忠実に再現した LES による CFD を行い、実験結果との比較により計算格子の空間解像度による影響及びその建物に作用する局部風圧の予測精度を評価した。さらに、実験で詳細に計測することが困難であるが、本解析結果の可視化によりその局部風圧に起因する建物近傍の流れ場は円錐渦等の 3 次元的な複雑な流れ場であることを明らかにした。こうした入隅部付近の局部風圧の予測やこれらを起因する流れ場の解明といった問題では、CFD において計算格子の解像度の依存性は大きいため、その計算精度を確保するためには高い精度の実験結果が必要であることも分かる。

#### 謝辞

本検討の成果は、東京工業大学の共同利用（産業利用）および先端研究施設共用促進事業『みんなのスパコン』TSUBAME によるペタスケールへの飛翔 トライアルユースにより TSUBAME 2.0 を利用した。ここに、記して謝意を表する<sup>6,7)</sup>。

#### 参考文献

- 1) 菊池浩利, 田村幸雄, 日比一喜: セットバックした建築物の局部風圧, 第21回風工学シンポジウム, pp.317-319, 2010.
- 2) 財団法人日本建築センター: 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 2008.
- 3) 田村哲郎: 建築物の耐風性能評価のための LES, 日本風工学会誌, 121(2009) 426-448.
- 4) OpenFOAM: <http://www.openfoam.com/>

- 5) AIJ: 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 2004.
- 6) ファム バン フック: 建築物の室内外環境の連成解析とその高速化技術の開発, 平成 22 年度 TSUBAME 共同利用(産業利用トライアルユース) 成果報告書, 2011.
- 7) ファム バン フック: 建築物の室内外環境の連成解析とその高速化技術の開発, 平成 23 年度 TSUBAME 共同利用(産業利用トライアルユース) 成果報告書, 2012