

## S18. 風圧力、耐風設計等の基準への数値流体計算の導入に関する検討（新規）

### 応募調査名

(イ) 実建築物を対象とした風洞試験及び大規模計算による数値流体計算

(ロ) 風洞試験と同等の妥当性のある数値流体計算の適用範囲に関する検討  
(平成28年度)

### 応募者

**東京工業大学 神戸大学**  
**大林組 鹿島建設 清水建設**

(技術指導: 国立研究開発法人 建築研究所)

## 建築基準法施行令第87条

建築物等の耐風設計をする際の風力係数等は平成12年建設省告示第1454号、1458号に定められた方法によるか風洞試験により求めることとされている。

## 数値流体計算(Computational Fluid Dynamics、CFD)

風洞試験と同等な風圧や風速分布の結果が得られることが大学や民間企業の研究成果として発表されるなど、技術的な発展が進んでいる。



## 建築基準整備促進事業の調査研究テーマ

「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」

### 目的

高層建築物等の性能評価(大臣認定)が実施される場合、風力係数等の評価に数値流体計算を用いるとき、数値流体計算の時間・空間解像度等の計算条件について、風洞試験と同等な妥当性のある結果を得ることができる範囲を明確にする。

## 各年度の実施内容

- イ) 実建築物を対象とした風洞試験及び大規模計算による数値流体計算(平成27年度)
- ロ) 風洞試験と同等の妥当性のある数値流体計算の適用範囲に関する検討(平成28年度)

# 平成27年度調査（イ）実建築物を対象とした風洞試験及び大規模計算による数値流体計算

## 実施方針

複雑な形状の実建築物に対して、数値流体計算により風洞試験と同等の結果が得られることを確認

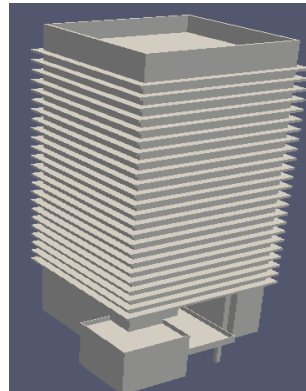
### 計算精度が検討できるHPC計算環境を整備

- 市街地に立つ実建築物を想定したCADデータに基づいて風洞実験模型、計算モデルを作成
- 実建築物を対象とする風洞試験の実施
- スーパーコンピュータ(大容量・高速度計算システム)による精緻な数値流体計算を実施し、建築物群まわりの風の流れ・風圧を精確に再現
- ベンチマークテスト用データベースを整備

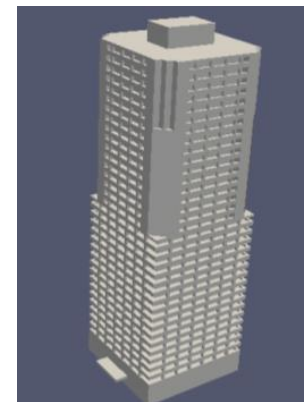
## 風洞実験

2種類の建築物の風洞実験：同一の模型を用いて3機関で実施し、実験結果のばらつきを検証

環境配慮型ファサードを有するオフィスビル  
(以下高層オフィス棟)



バルコニーを有する高層集合住宅  
(以下高層住宅棟)

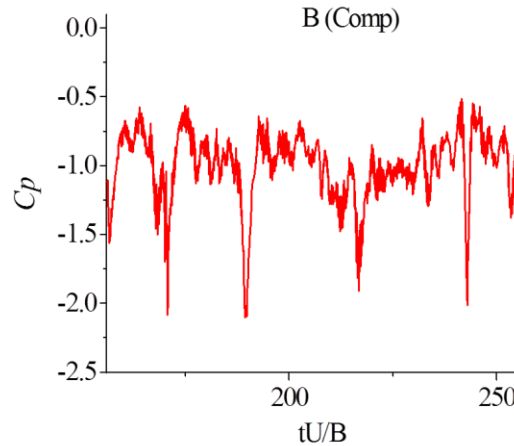
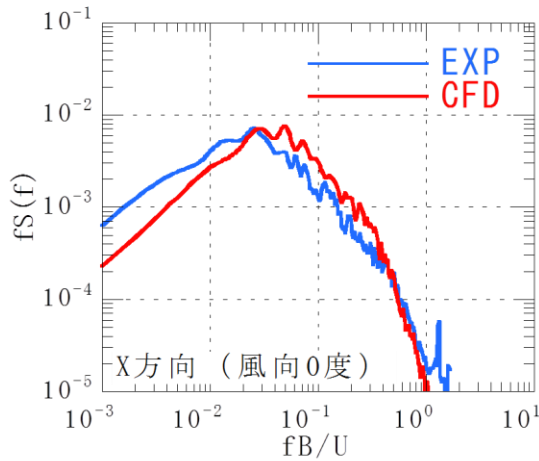


建築物へ接近してくる流れの性状も実験で捉え、風圧が建物に作用するプロセスも検証

# 平成27年度調査 (イ) 実建築物を対象とした風洞試験及び大規模計算による数値流体計算

大規模  
数値流体計算

建築物に作用する風力の変動：  
高周波数成分を含めた広帯域の非定常的な風の変動を予測



耐風設計用非定常計算法  
Large Eddy Simulation (LES)

⇒ 様々なスケールの渦や乱れを含む広帯域の流速変動場の再現

建築物骨組の動的応答：  
0.1～数秒 ( $tU_H/B$ : 0.1～1程度)

外装材に作用する  
ピーク風圧：数秒 ( $tU_H/B$ : 1程度)

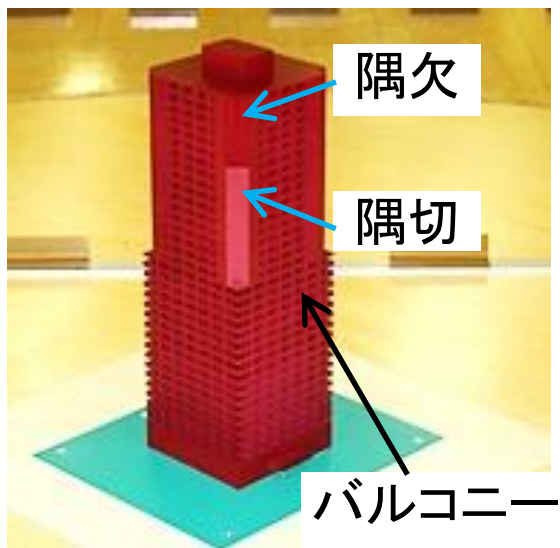
## 計算条件

非構造格子	数億メッシュ
計算時間・平均化時間	複数の実時間10分相当のデータによるアンサンブル平均
SGS乱流モデル	建築物まわりの剥離流れに対応可能なモデルを選定
レイノルズ数	風洞実験と一致
流入変動風：	市街地を想定した乱流境界層

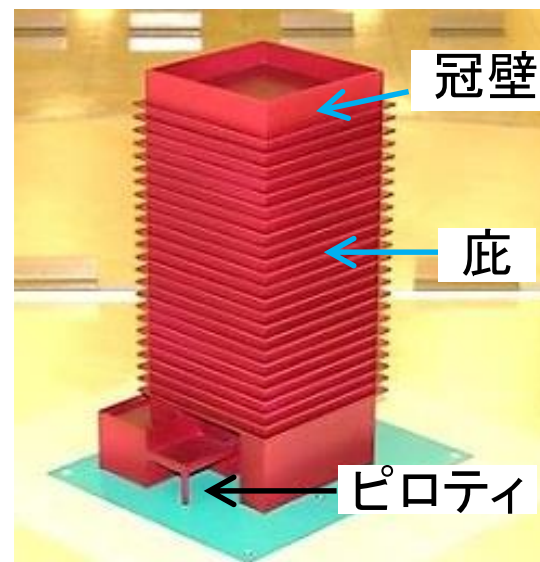


●以下の2棟の対象建築物に対して、周辺街区のありとなしを実施した。

対象建築物  
(縮尺1/400、  
建物高さ128m)



高層住宅棟



高層オフィス棟

対象建築物  
の周辺  
(流入気流は  
地表面粗度区分  
Ⅲ)



周辺街区あり(街区中)



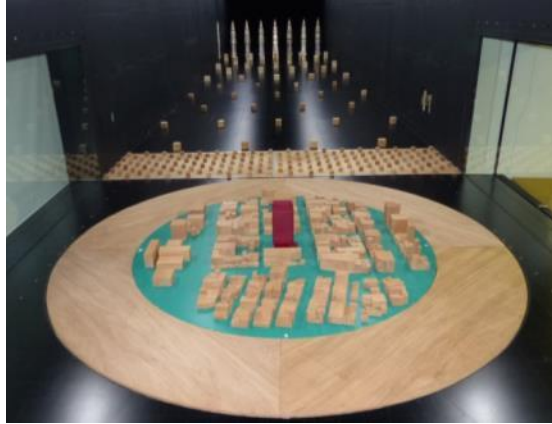
周辺街区なし(単体)



- 実験のばらつきを検証するために、3機関の風洞で計測。



機関A

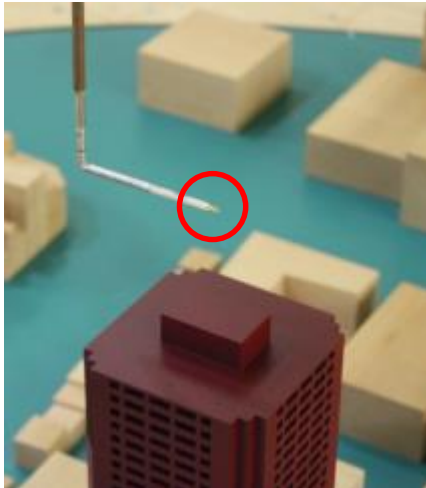


機関B



機関C

- 熱線風速計、PIV(機関Bのみ)、多点同時風圧計により風速と風圧を非定常計測。



X型熱線風速計



PIV



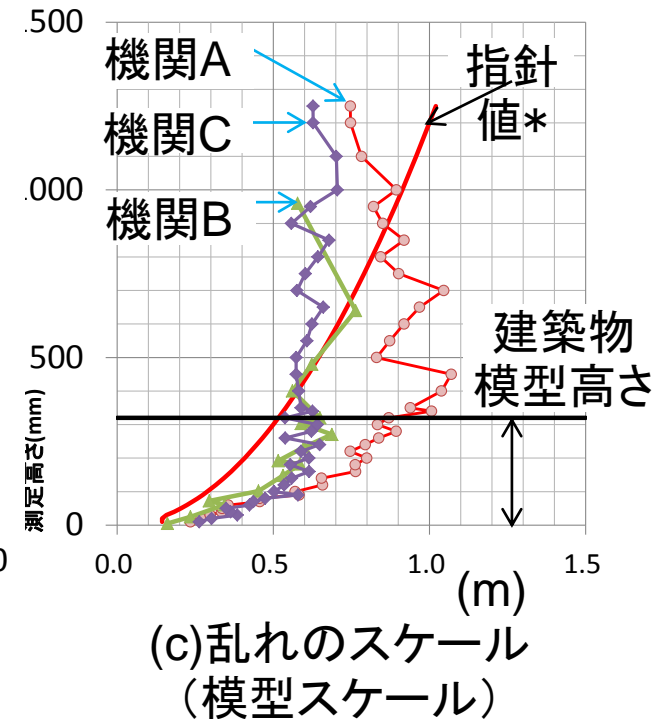
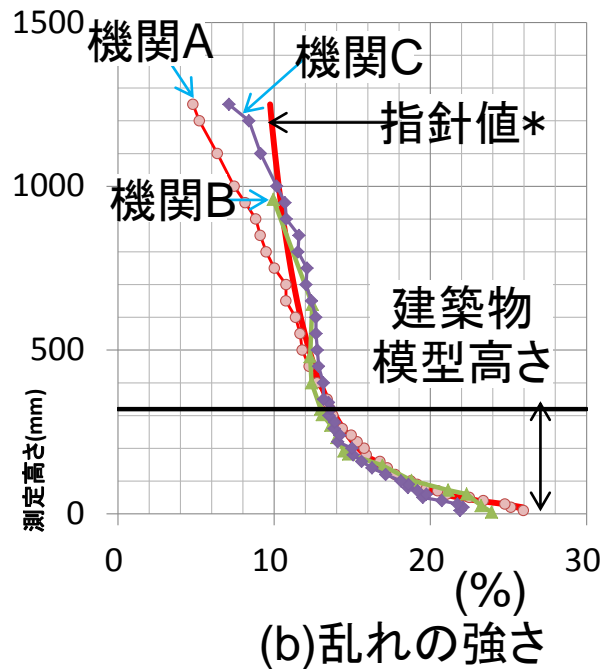
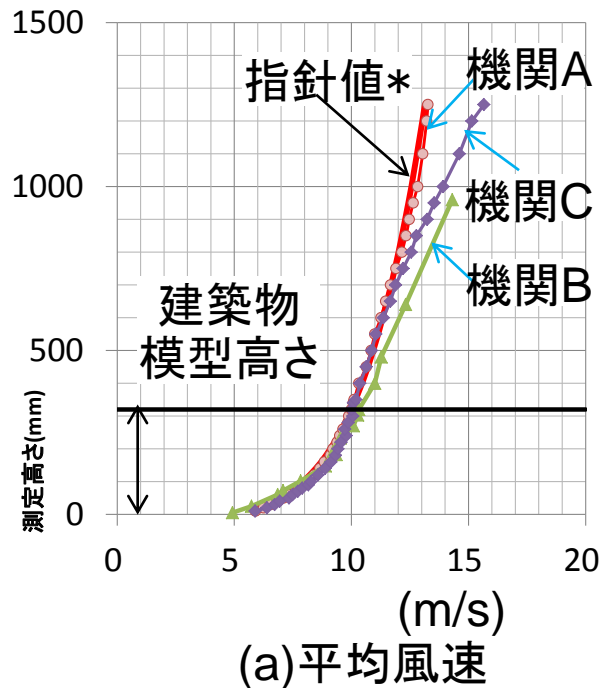
多点同時風圧計測(風圧模型)

# LES検証用風洞実験 ～計測条件と風速実験結果

## ●風速および風圧実験の計測条件

- ・対象建築物の頂部風速: 10m/s
- ・サンプリング振動数: 1000Hz
- ・データ数 : 65536 個

- 計画建物中心位置より1m風上の位置での3機関の流入気流の風速勾配を比較。  
乱れのスケールにはばらつきがあるが、平均・乱れの強さではほぼ一致。



3機関の流入気流

\*指針値: 建築物荷重指針による値



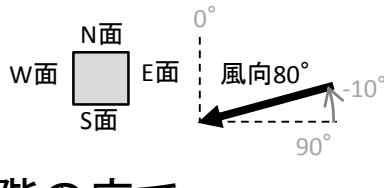
●ピーク風圧係数の算出のための条件

- ・規模効果に対する時間軸上の平均化個数:5個
- ・ピーク風圧のアンサンブル平均個数:9個

●特別な風向角を例に見ても、3機関のピーク風圧係数のばらつきが非常に小さいことがわかる。

●以下に着目し、LESで検証すべき特別な風向角を選定。

- ・住宅棟の隅欠・隅欠部に生じる負のピーク風圧係数が最小となる風向角  
→正対する風向角90°に対して80°



- ・オフィス棟の冠壁や最上階の庇で生じる負のピーク風力係数が最小となる風向角  
→正対する風向角90°に対して65°

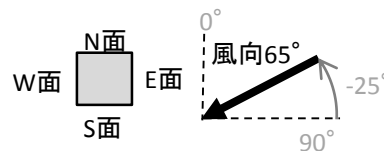
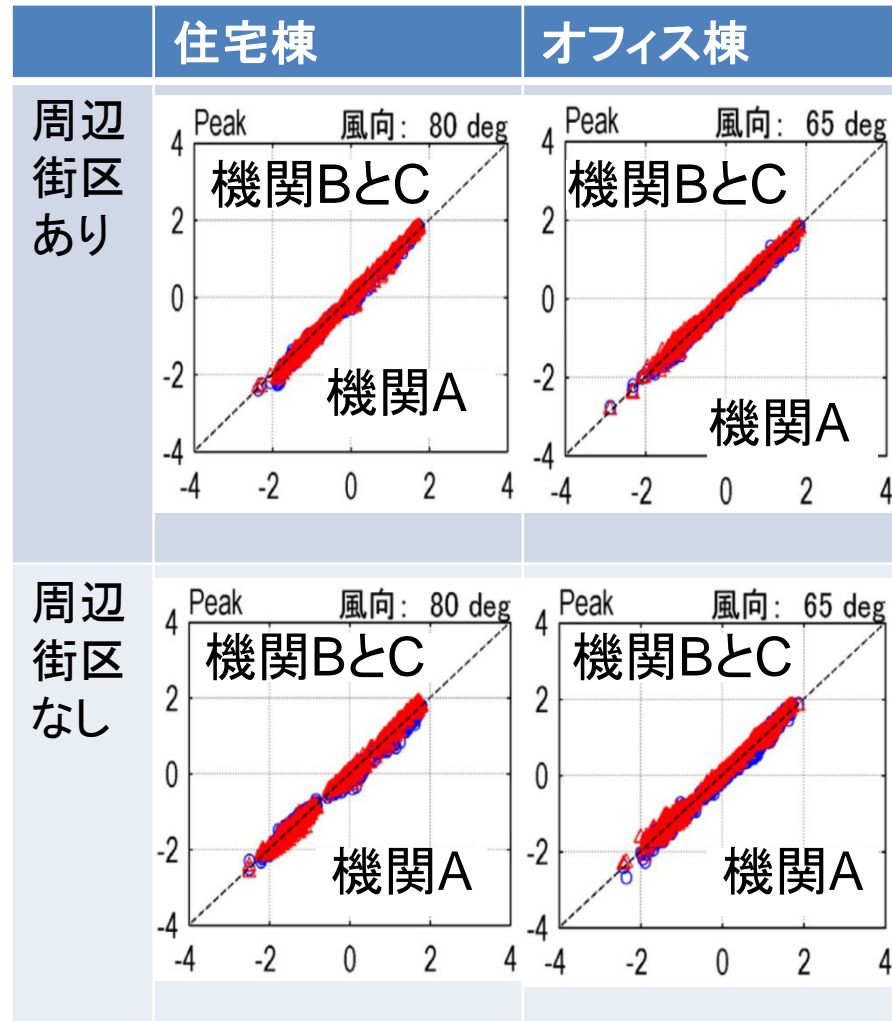


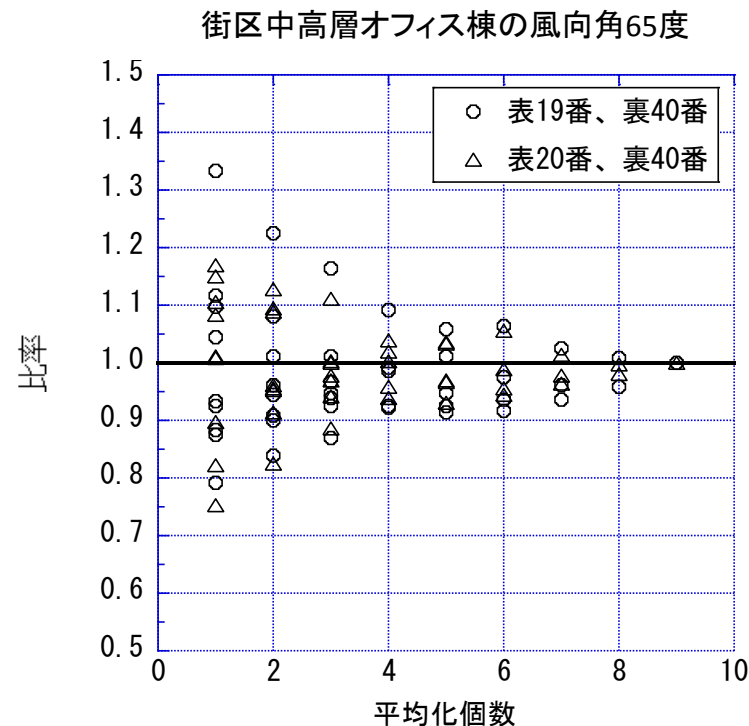
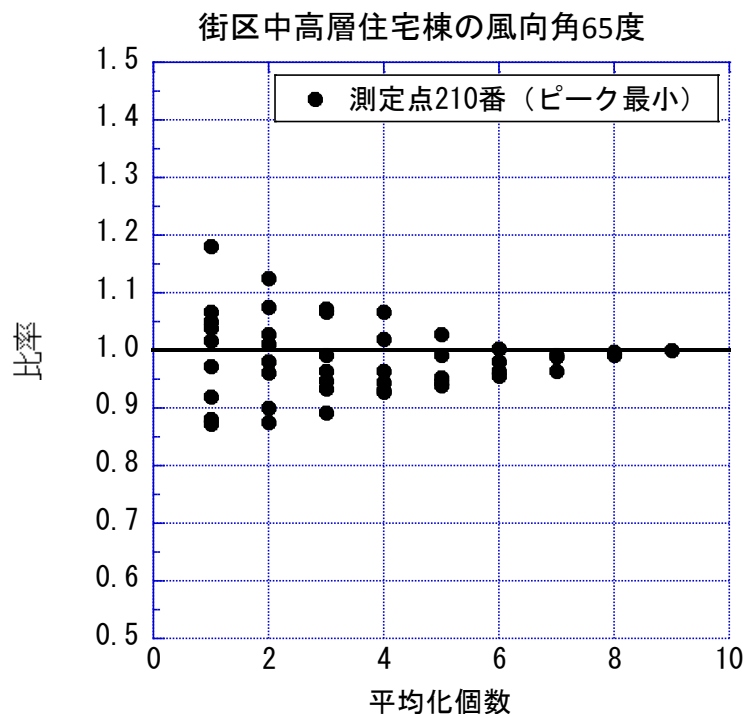
表 特別な風向角時の3機関のピーク風圧係数のばらつき

[横軸:機関A、縦軸:機関B(青○)、機関C(赤△)]



# LES検証用風洞実験～風圧実験結果(2)

●アンサンブル平均化個数に伴うピーク風圧係数の評価のばらつきを調査した。



高層住宅棟の隅切部 ( $z=94.2\text{m}$ ) の  
最小ピーク風圧係数

高層オフィス棟の冠壁の  
最小ピーク風力係数

特別な風向角における街区中のピーク風圧係数又はピーク風力係数の  
平均化個数に伴う比率の変化(平均化個数9個の値が基準)

●ピーク風圧係数・風力係数は、アンサンブル平均値を5個以上とれば、9個平均のアンサンブル平均の値に対して、10%以内の誤差に収まる。

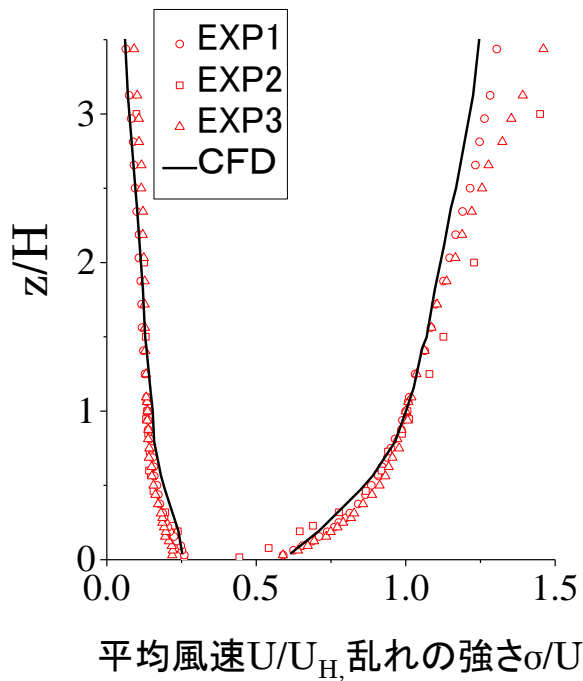
格子	非構造格子・節点中心
空間離散化	二次中心 二次中心(95%)+一次風上(5%) (対流項)
アルゴリズム 時間積分	SMAC法 Euler陰解法
SGSモデル	標準 Smagorinsky model ( $C_s=0.12$ ) Van Driest型の減衰関数を乗じる

## 境界条件

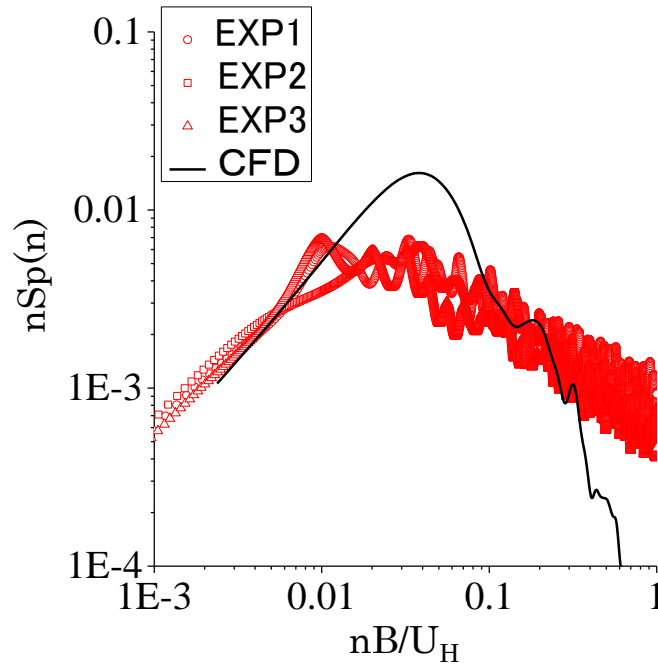
	速度	圧力p	補正関数p'
流入	別途作成したものを 線形補間	ノイマン	ゼロ
流出	ノイマン		ノイマン
側面・上面	Free-Slip境界条件		ノイマン
壁面	壁関数		

Jarrinら(2009)による合成渦法(Synthetic Eddy Method: SEM)に従い作成

→ 計算の安定性確保のため、LESの流入境界条件とし  
粗度ブロックを配置した領域内を吹走  
抽出断面での風速の時刻歴波形を流入変動風



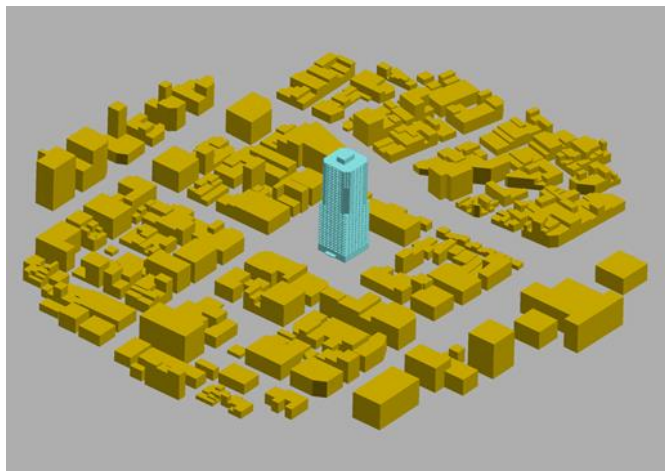
風速の鉛直分布



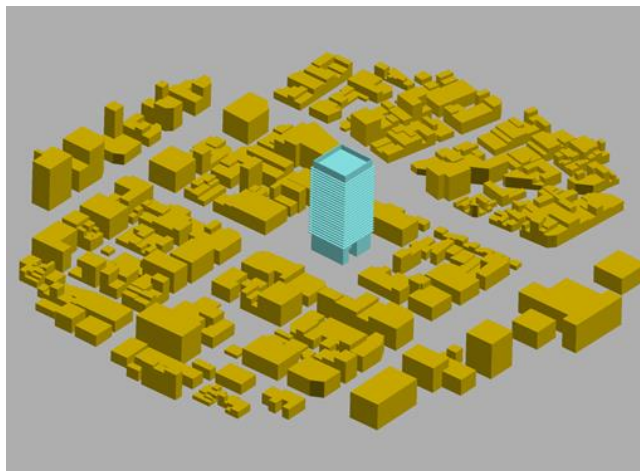
パワースペクトル密度

H: 建築物の頂部高さ[m]  
 U: 高さzにおける平均風速  
 $U_H$ : 建物頂部高さにおける平均風速[m/s]  
 $\sigma$ : 風速の標準偏差[m/s]  
 n: 周波数[Hz]  
 Sp: パワースペクトル密度[s]

解析結果と実験結果(3機関)との比較



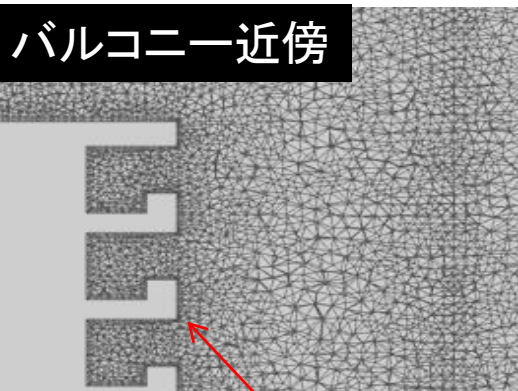
高層住宅棟



高層オフィス棟

解析モデル

バルコニー近傍



境界層プリズム厚さ  
(最小格子サイズ)

0.06m

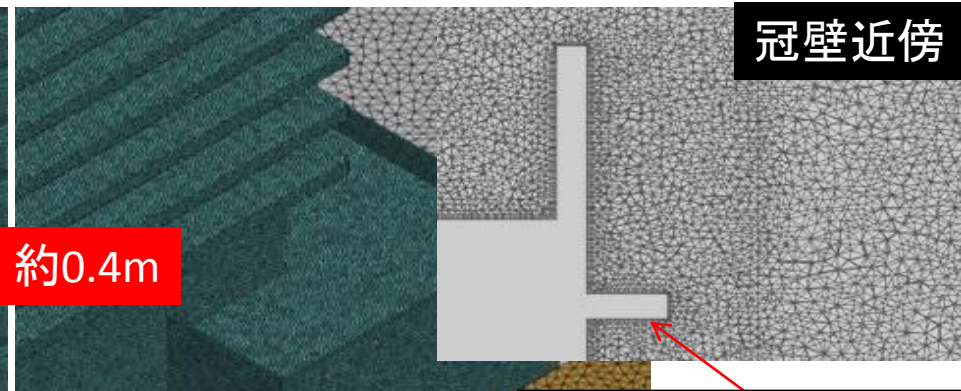
高層住宅棟

建築物表面

約0.4m

計算格子

冠壁近傍



境界層プリズム厚さ  
(最小格子サイズ)

0.06m

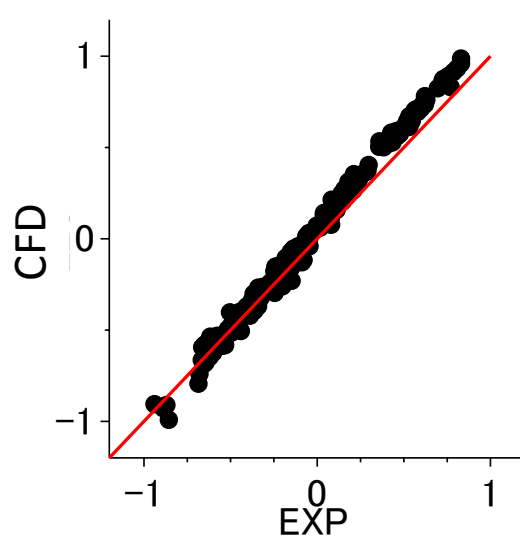
高層オフィス棟

両建築物(周辺あり、なし)ともに約2億要素規模

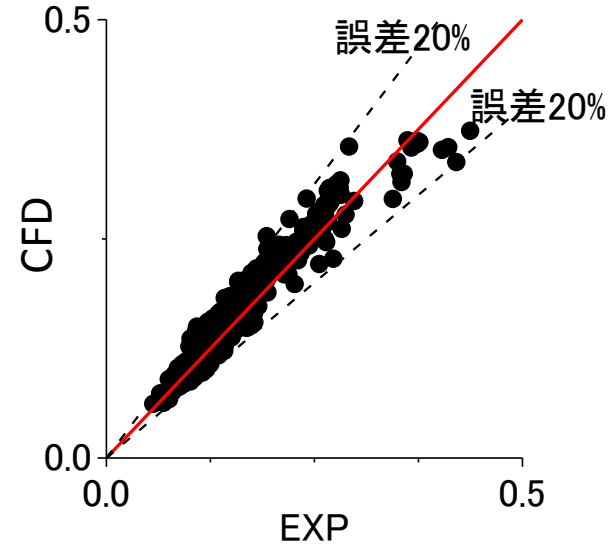


	格子点数	風向°	周辺	アンサンブル 平均回数
高層オフィス棟	約2億	0	有	2
	約2億	65	有	3
	約2億	90	有	1
	約2億	90	無	1
	約18億	65	有	1
高層住宅棟	約2億	0	有	2
	約2億	80	有	3
	約2億	90	有	1
	約2億	90	無	1
	約20億	80	有	1

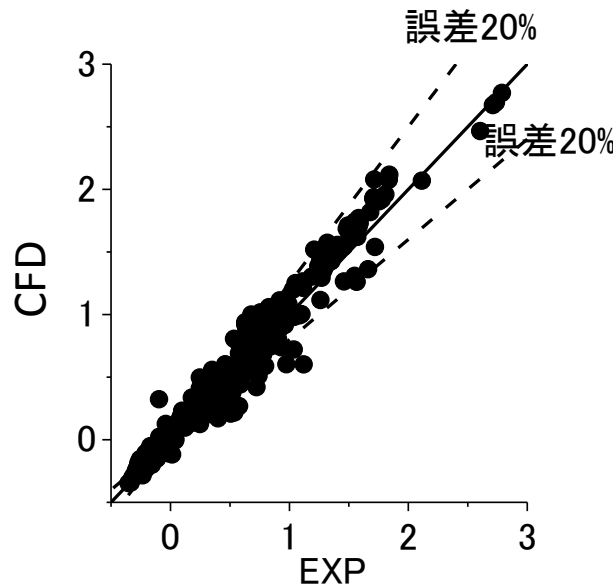
スーパーコンピュータ「京」256ノード利用し、計算時間は約2億点格子のケースで実時間10分間相当が約54時間



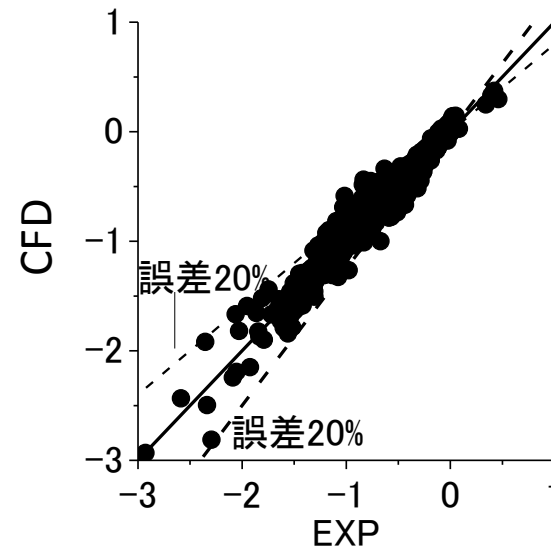
平均風圧係数



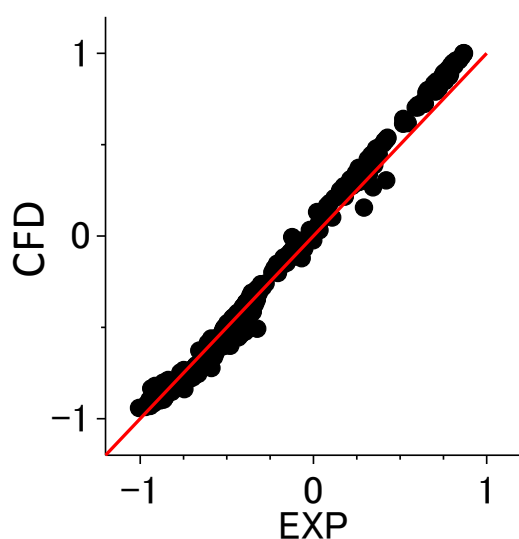
変動風圧係数



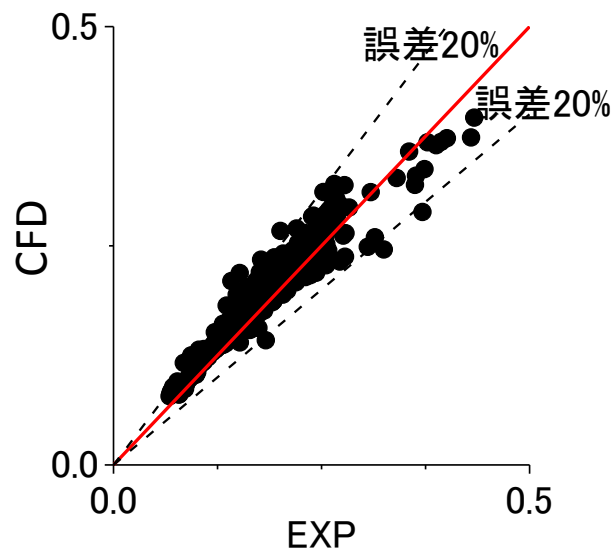
最大ピーク風圧係数



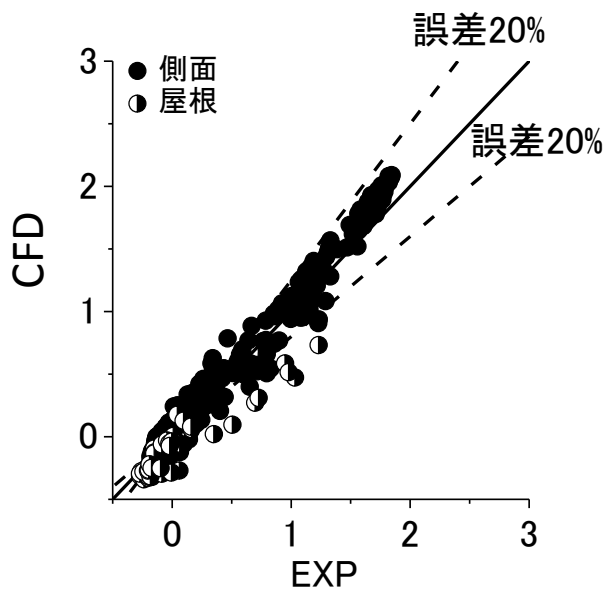
最小ピーク風圧係数



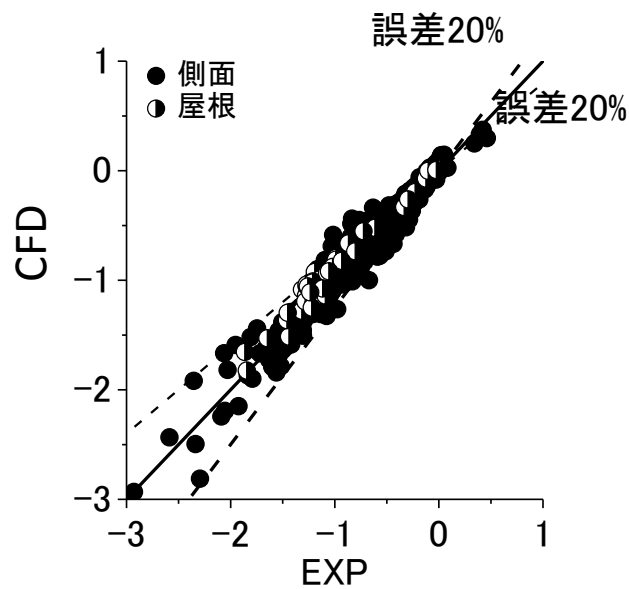
平均風圧係数



変動風圧係数

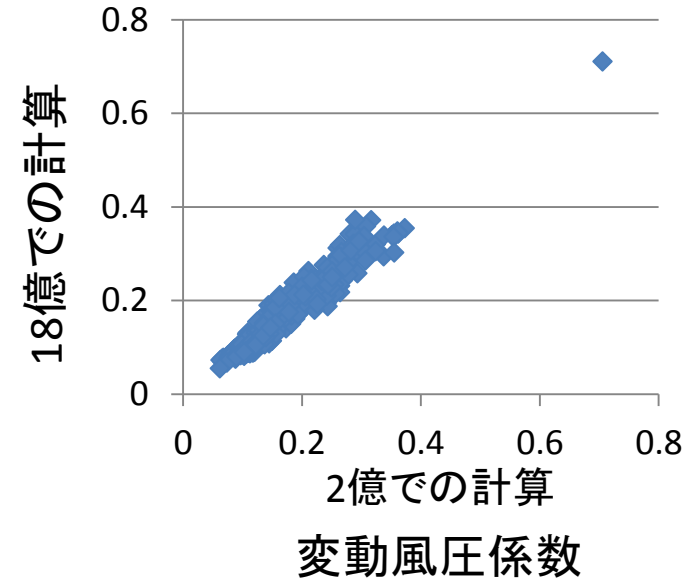
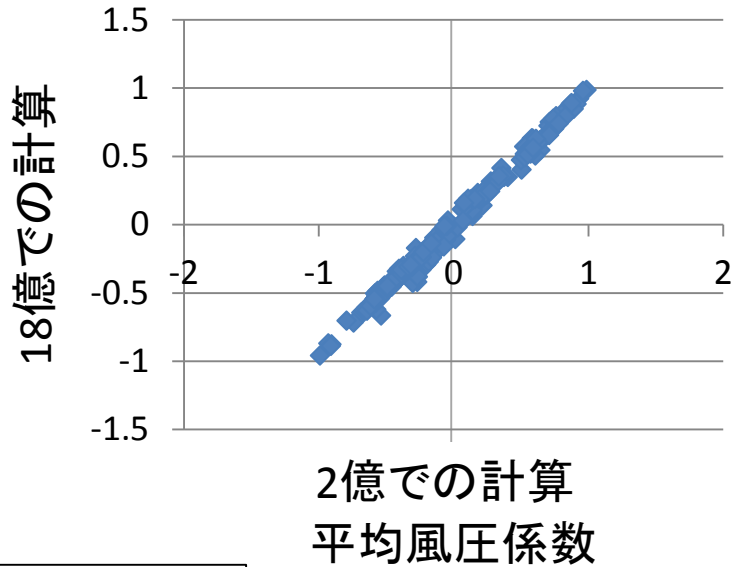


最大ピーク風圧係数

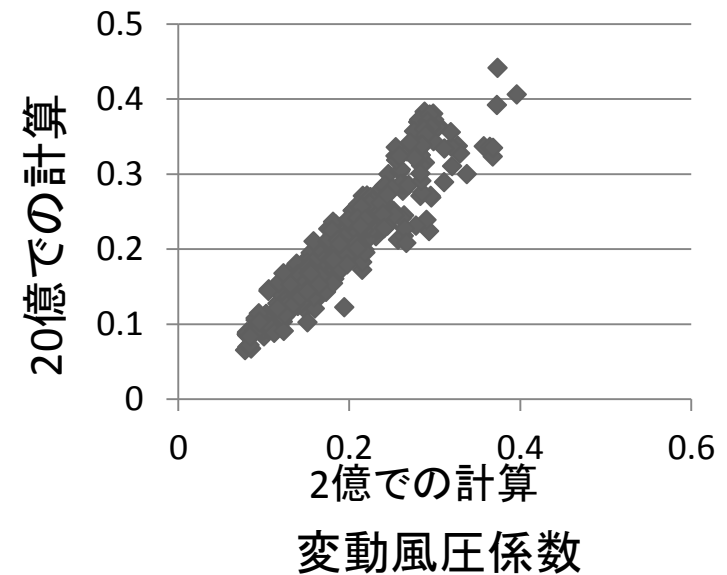
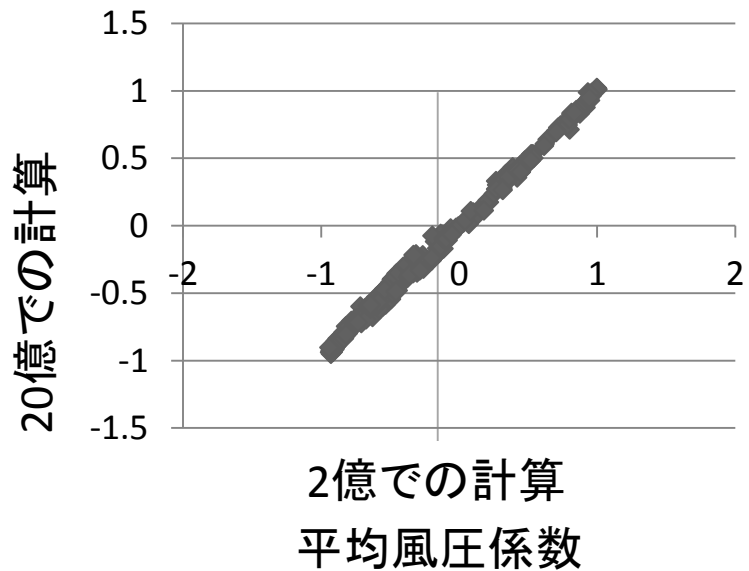


最小ピーク風圧係数

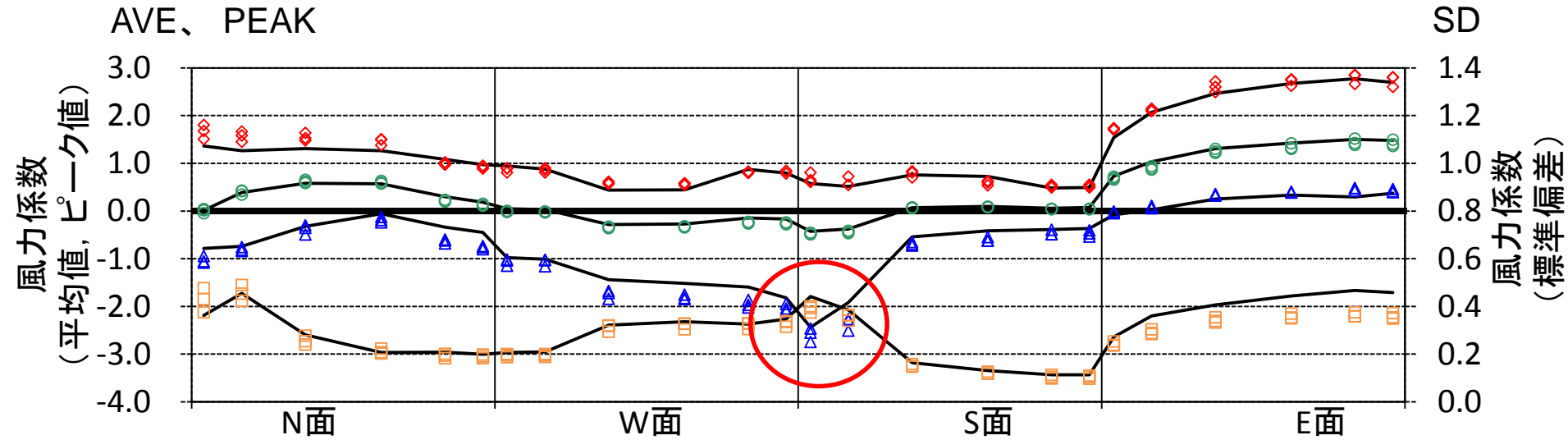
## 高層オフィス棟



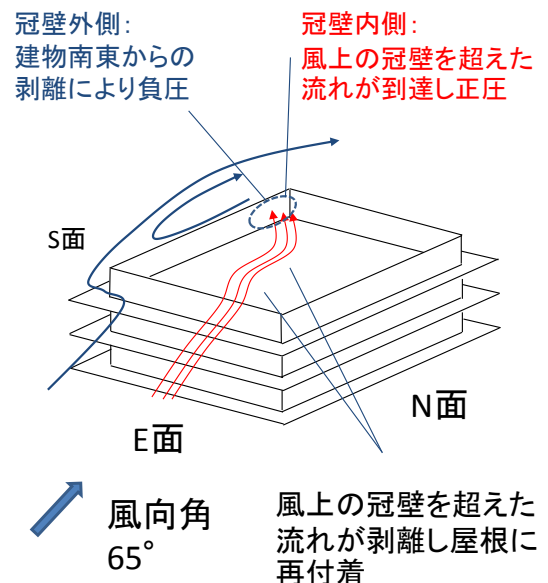
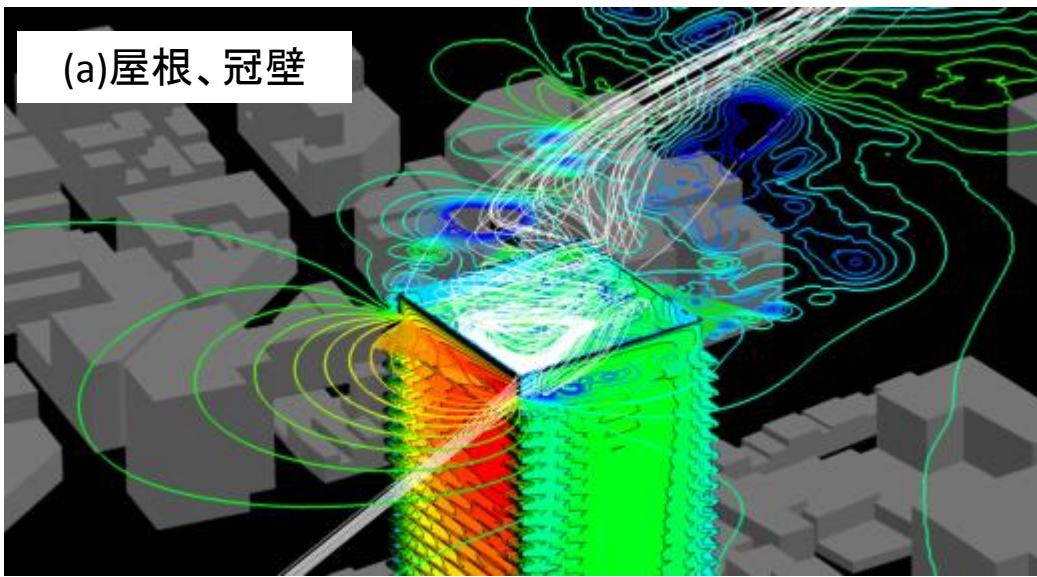
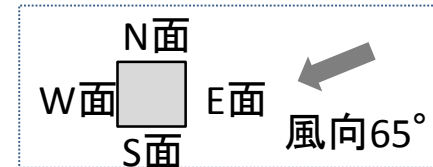
## 高層住宅棟



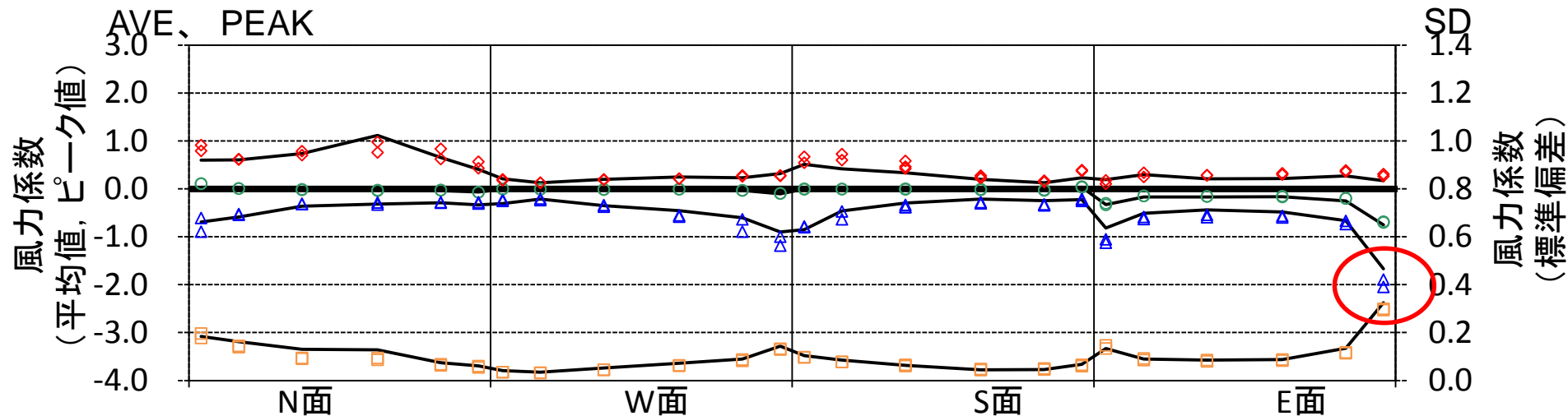
# 冠壁 (z=123m)の風力係数 (高層オフィス棟、風向角65度)



実験結果: ○平均 □変動 ◇最大 △最小 計算結果: ライン

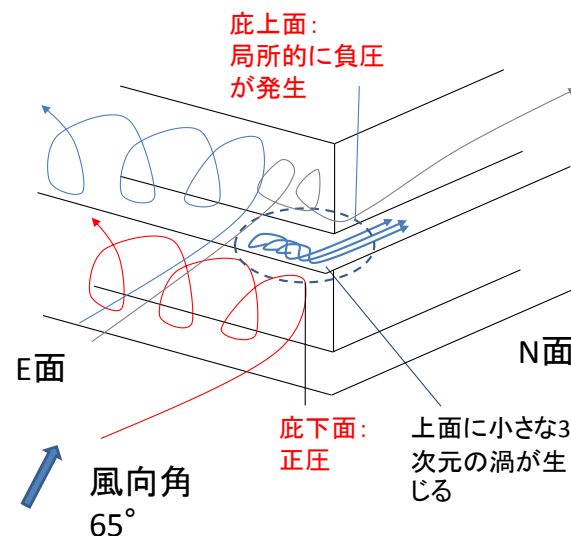
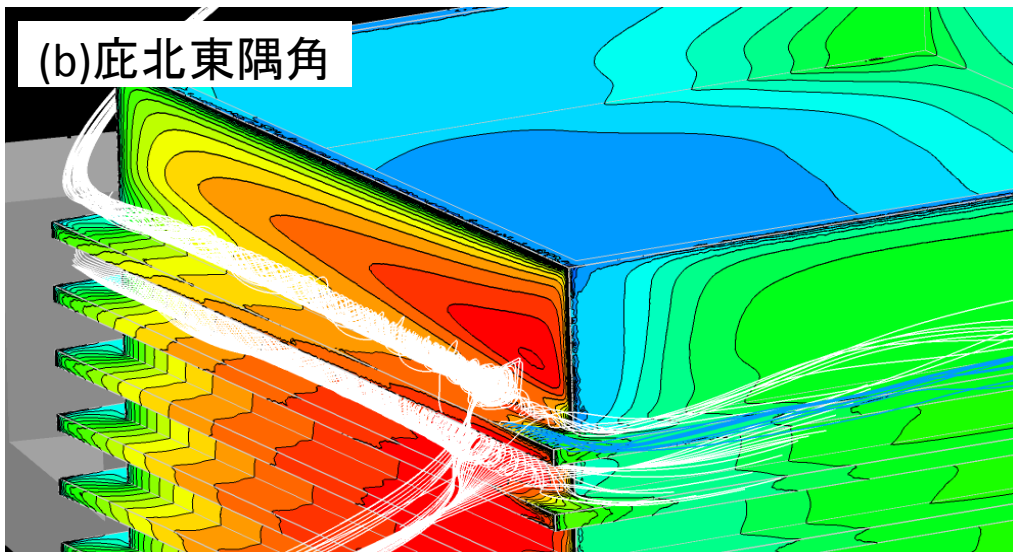
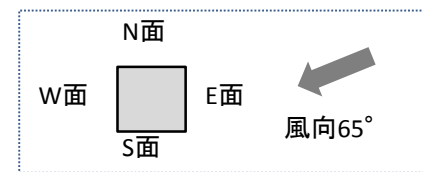


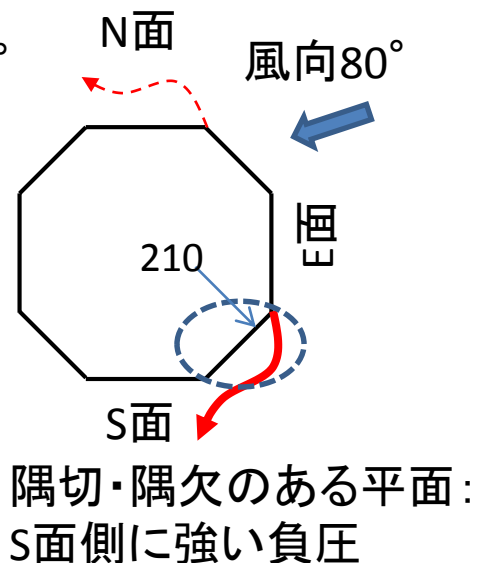
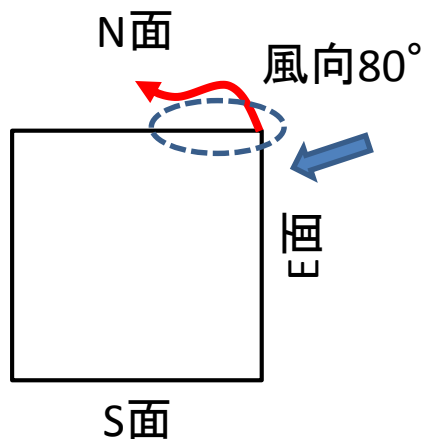
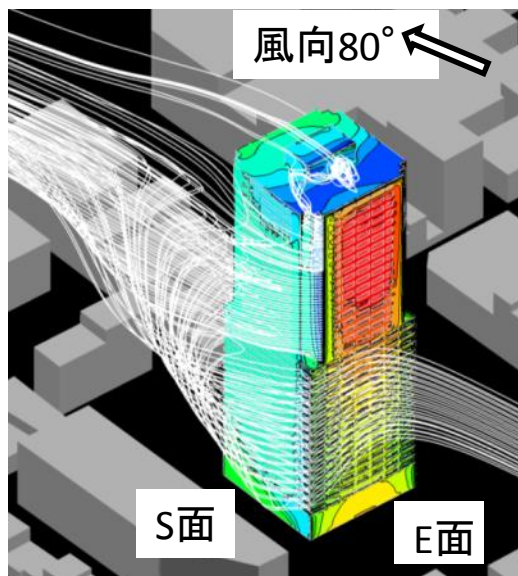
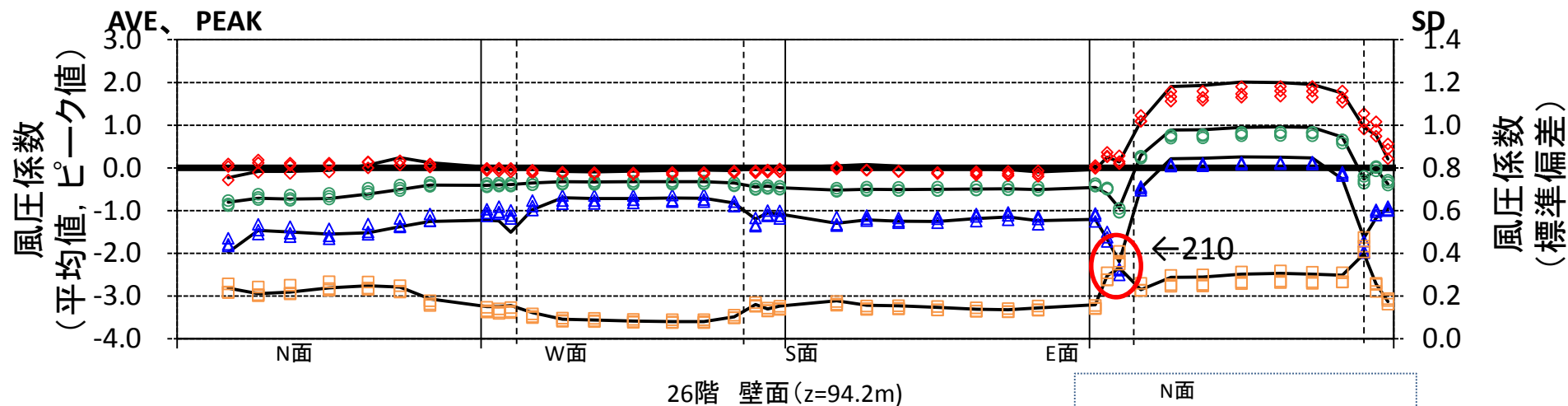




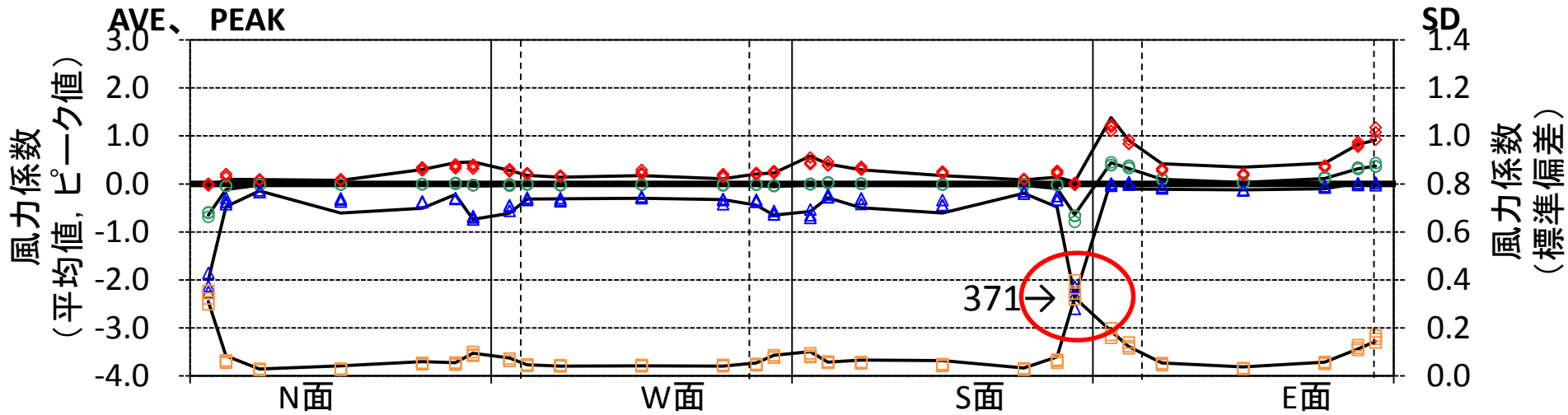
実験結果: ○平均 □変動 ◇最大 △最小 計算結果: ライン

26-27階 間 庇 (z=113.5m)



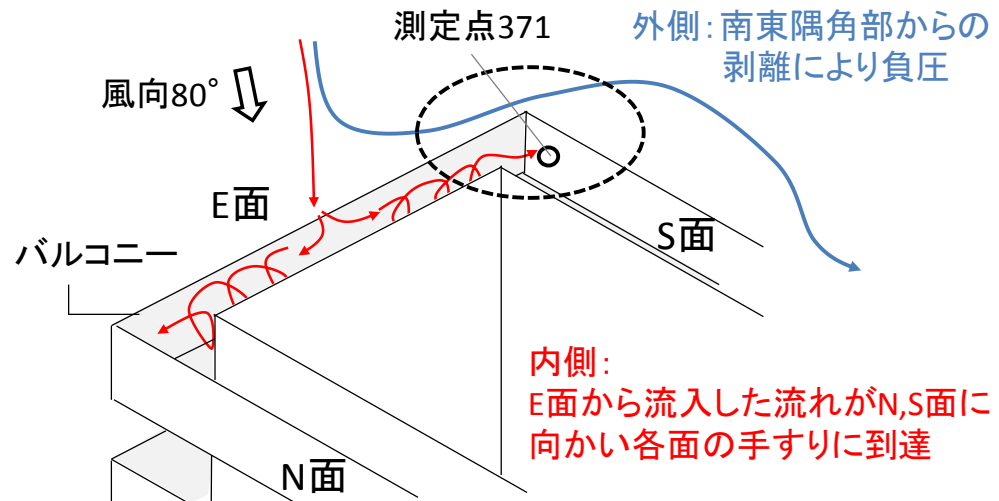
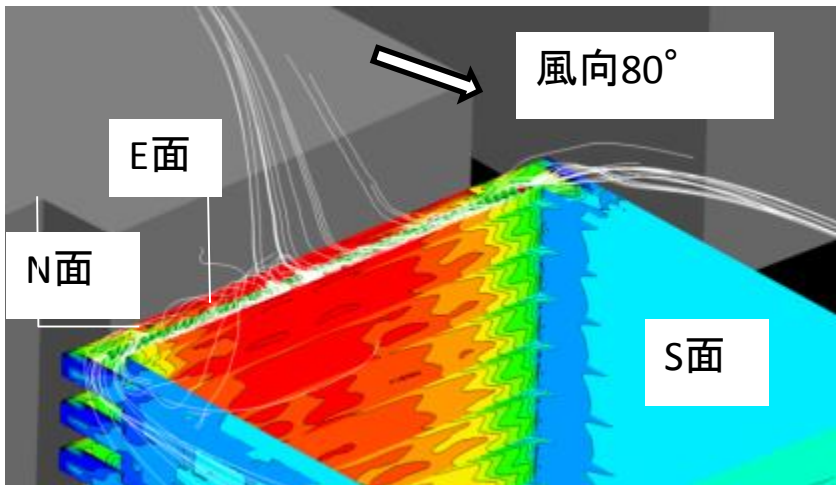
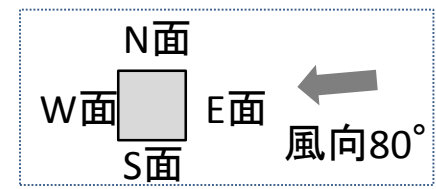


# バルコニーの風力係数(高層住宅棟、風向角80度)



実験結果: ○平均 □変動 ◇最大 △最小 計算結果: ライン

11階 バルコニー (z=40.7m)



国土交通省住宅局建築指導課、国土技術政策総合研究所、建築研究所、指定性能評価機関のメンバーを集めた「数値流体計算技術検討委員会」を設置するとともに、耐風設計に関する学識経験者を交えた懇談会を実施し、数値流体計算の実用化に向けた課題を抽出した。

- 各機関が積極的に数値流体計算を活用し、信頼性を含めた論文などの公表活動と実績を積み上げる必要がある
- 「チャンピオンデータベース」による検証により数値流体計算の設計者、実務者に対する信頼性を確保する
- 数値流体計算、風工学における物理的な現象の理解に関する設計者、実務者への教育が必要である
- 風洞実験ガイドブックと同様なCFDの妥当性が判断できる資料を整備する
- 数値流体計算の円滑な利用を推進させるために建築センターなど指定性能評価機関における内規等において、関連の記述方法を明らかにする

## 風洞実験

- CADデータに基づいて風洞実験用の模型を作成し、複数の機関で同一模型を用いた風洞実験を実施し、実施機関3機関による結果のばらつきを検証した。
- 高層住宅棟および高層オフィス棟の風圧・風力の特性を明らかにし、LESで検証すべき耐風設計上重要な風向角を選定した。

## 数値流体計算

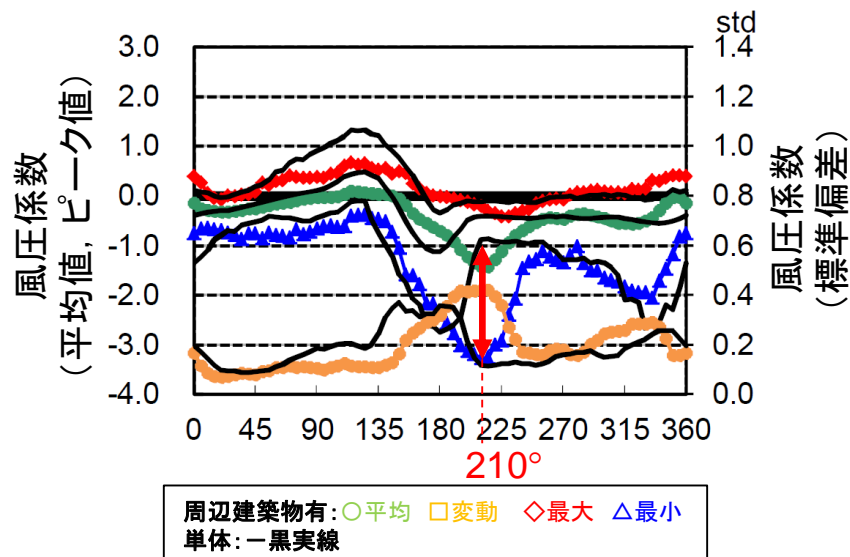
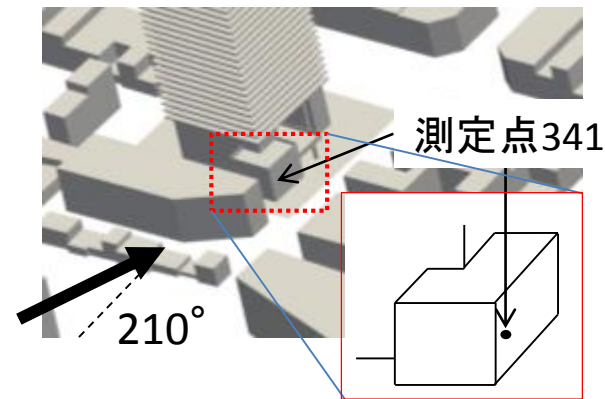
- CADデータに基づいて風洞実験の模型と同一形状の解析モデルを作成し数値流体計算を実施した。
- 隅角部形状や庇等の外装材周りに生じる流れ場と風圧・風力の関係を明らかにし、構造骨組に対する層風力を示した。数値流体計算結果と風洞実験結果が良い対応を示すことを確認し、チャンピオンデータを提供した。

## 数値流体計算の実用化に向けた今後の課題

- 各機関が積極的に数値流体計算を活用し、案件適用に当たっては、チャンピオンデータに基づく検証による信頼性の確保に努める。
- 審査側に対しては、審査の際のチェック項目の整理を行い、指定性能評価機関を通じて内規等の審査資料への記述方法を明らかにする。



- チャンピオンデータをベースとした各種コードでの検証
- 平成27年度チャンピオンデータの追加計算 (風向, 波数等)
- 実設計への適用性の判定
- 未解決のテーマ
  - ・低層市街地 + 中層板状住宅
  - ・高層建築物が隣接したケースの解析 (周辺街区による風圧係数の変化例, 右図)



測定点341の風向角変化に伴う風圧係数 (片面計測、街区中および単体)



風洞試験と同等な妥当性のある結果を得ることができるCFDの適用範囲・計算条件の範囲を明確にする。