

ヨドバシ仙台第 1 ビル計画  
環境影響評価準備書からの修正事項及び補足資料

平成 28 年 7 月

株式会社ヨドバシカメラ

## 目 次

補足資料

別紙① ..... 1

別紙② ..... 8

## 風害予測におけるガイドラインに対する対応について

### 1. 概要

ヨドバシ仙台第1ビル計画に係る環境影響評価準備書における風害予測について、「市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブックーガイドラインと検証用データベースー」(2007年7月、日本建築学会)第Ⅲ編 市街地風環境予測のための流体数値解析の利用に関するガイドライン(以下、ガイドラインとする)における記載事項に対する本予測における設定等を表1に記載した。

表 1 ガイドラインに対する対応

項目	ガイドラインでの記載事項	本予測での設定等
計算領域の大きさ	<ul style="list-style-type: none"> <li>主流直行方向断面の計算領域の大きさについては、閉塞率(建物群の見つけ面積を解析領域の見つけ面積で除したもの)がおおむね3%以下となるように設定する。</li> </ul>	閉塞率は下記のとおりとした。 建築前：東西方向 2.09% 南北方向 2.08% 建築後：東西方向 2.12% 南北方向 2.13%
	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用する解析コードの精度検証を目的として、風洞実験が行われている単体建物モデル周辺の流れを解析する場合</li> </ul>	本予測は精度検証を目的としていない。
	<ul style="list-style-type: none"> <li>実際の市街地を対象とする場合には、鉛直方向の計算領域が狭いと上空部分での風速プロファイルが変化する可能性があるため、なるべく広くすることが望ましい。その高さは日本建築学会・建築物荷重指針で規定されている境界層厚さ(粗度区分Ⅱで350m、Ⅲで450m、Ⅳで550m)程度を目安とする。</li> </ul>	境界層高さ：粗度区分Ⅲより450m
	<ul style="list-style-type: none"> <li>実際の市街地を対象とする場合の水平方向の計算領域の幅は、計画建物等の外縁から測って、当該建築物の高さHの5倍程度を目安とし、計算領域の外周面を流入または側面境界とする。ただし、そこに含まれる建物群の見つけ面積が、この水平方向の計算領域幅と上記計算領域高さにより定まる断面積のおおむね3%以下(閉塞率3%以下)となるように計算領域幅を決定する。</li> </ul>	2,200m(X)×2,200m(Y)×500m(Z) (建物高さ：H=地上約45m)  閉塞率は下記のとおりとした。 建築前：東西方向 2.09% 南北方向 2.08% 建築後：東西方向 2.12% 南北方向 2.13%
	<ul style="list-style-type: none"> <li>上記の範囲外であっても、風上に大きな建物や地形・地物がある場合には、更に解析領域を広げてこれらを含める必要がある。</li> </ul>	本予測は該当しない。
周辺建物の再現範囲	<ul style="list-style-type: none"> <li>対象建物周辺の評価対象範囲(一般的に1~2H)および、その外縁少なくとも1街区以上の範囲では、建物形状をできるだけ正確に再現すべきである。</li> </ul>	計画地を中心とした半径200m程度の範囲について再現を行った。
	<ul style="list-style-type: none"> <li>さらにその外周から計算領域の境界付近までは、建物群の形状を単純化して再現するか、少なくとも建物群の流体力学的抵抗を再現するようにモデル化する。</li> </ul>	今回使用した解析ソフトは風洞実験の再現を基本としているため、計算領域の境界付近までの建物群の再現は必要ないと考えている。

項目	ガイドラインでの記載事項	本予測での設定等
メッシュよりも小さい建物、樹木等の取扱い	<ul style="list-style-type: none"> <li>計算メッシュより小さい物体で、評価点の風環境に無視し得ぬ影響を及ぼすと予想されるものについては、その流体力学的影響、すなわち風速の減衰と乱れの増加を表現する付加項を基礎方程式に対して加える必要がある。</li> </ul>	本予測では該当しない。
	<ul style="list-style-type: none"> <li>風環境の対策として最もよく用いられる樹木に関しては、樹木キャノピーモデルを用いることにより、その効果を評価することができる。</li> </ul>	本予測では風環境対策として樹木を用いていないため、該当しない。
メッシュ分割	<ul style="list-style-type: none"> <li>対象建物端部で発生するはく離流を十分再現できるメッシュ分割とすることがある。</li> </ul>	404 (X) × 404 (Y) × 66 (Z) 計 10,772,256 メッシュ
	<ul style="list-style-type: none"> <li>実務の場合でのビル風の解析では、no-slip 条件の適用は困難であるため、高 Re 数型の乱流モデルを使って、壁面の境界条件を壁関数とし、粗いメッシュ分割で解析を行う場合が多い。</li> <li>本ガイドラインでは、壁関数の使用を前提とする。</li> </ul>	対数則を用いた壁関数により設定した(詳細については本資料 p.7 参照)。
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ドームや円柱状の建物のような場合には、注意が必要である。</li> </ul>	本予測では該当しない。
分解能の目安	<ul style="list-style-type: none"> <li>対象建物及びその周辺の風速の評価点が含まれる範囲については、最低でも建物スケールの 1/10 程度の分解能とするべきである。</li> </ul>	計画地周辺でのメッシュ間隔は 2m とし、計算領域端にかけて徐々にメッシュ間隔を粗くした (H/10=約 4.5m)。
	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般に市街地風環境の場合には、実物相当で 1.5m~5.0m の高さで評価するので、その高さに速度の定義点が位置するようにメッシュ分割を決定する必要がある。</li> <li>一般的な風速評価高さ(1.5m~5.0m)が 3~4 番目のグリッドになるようにメッシュを配置するべきである。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地表面周辺(高さ 10m まで)でのメッシュ間隔は 1m とし、上空に向かうにつれて徐々にメッシュ間隔を粗くした。</li> <li>3~4 番目のグリッドの高さは 3~4m となる。</li> </ul>
解のメッシュ依存性の確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>複数の異なるメッシュ分割で解析を行い、結果が大きく変わらないことを確認するべきである。</li> </ul>	格子依存性が小さいことを確認済みである。
非構造格子を使用する場合の留意点	本予測では該当しない。	
流入境界条件(風速)	<ul style="list-style-type: none"> <li>流入風速の鉛直分布は、例えば建築学会荷重指針等を参考とし、べき乗則で与える。</li> </ul>	べき乗則による鉛直風速プロファイルを全域に設定した。

項目	ガイドラインでの記載事項	本予測での設定等
流入境界条件 ( $k$ 、 $\varepsilon$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>k</math> の鉛直分布は実験や観測結果等を参考に与える。</li> <li>• 例えば日本建築学会建築物荷重指針の乱れの強さの鉛直分布の推定式を参考に <math>k</math> を与えることができる。</li> <li>• 流入の <math>\varepsilon</math> の鉛直分布は <math>k</math> の生産と散逸がほぼ釣り合っていると仮定し与える。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>k</math> の鉛直分布は、「建築物荷重指針・同解説(日本建築学会、2015年2月)」に示された地表面粗度区分別の乱流強度 <math>Lz(=\sigma/U)</math> の観測例と指針値から、25%とした(本資料 p.6、図2参照)。</li> <li>• <math>\varepsilon</math> の鉛直分布は、ガイドラインの式(3.4)及び式(3.5)により与えた。</li> </ul>
上空面・側面境界条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 「計算領域の大きさ」で述べた程度に計算領域を大きく取れば、上空面、側面の境界条件は対象建物周辺の予測結果に大きな影響を及ぼさない。</li> <li>• 計算領域を十分広く取って、slip壁の条件とすると、計算が安定に行われる。</li> </ul>	計算領域を十分広く取って、slip壁の条件としている。
流出境界条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 流出面の法線方向に対して勾配ゼロの条件を用いることが一般的であるが、その場合、建物の影響を受ける領域から十分離れた位置に流出境界を設ける必要がある。</li> </ul>	<p>流出面の法線方向に対して勾配ゼロの条件を用いた。</p> <p>流出境界は、解析領域の外縁部に設定しており、建物の影響を受ける領域から十分離れた位置に設定している。</p>
固体面境界条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 解析対象とする地表面の実状に合わせた境界条件を用いるべきである。</li> <li>• 地表面の粗さが粗度長 <math>z_0</math> で表現できる場合には、<math>z_0</math> を含んだ対数則等を用いてその影響を考慮すべきである。</li> </ul>	資料 p.7 に示す対数則を用いた。
乱流エネルギー $k$ 及び $k$ の散逸率 $\varepsilon$	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 乱流エネルギー <math>k</math> <math>k</math> の地表面法線方向の勾配をゼロとし、<math>k</math> の輸送方程式を解く。</li> <li>② <math>k</math> の散逸率 <math>\varepsilon</math> 壁面第1セルの <math>k</math> の値から(3.10)式により算出することが多い。</li> </ol>	本資料 p.8 に示す $k$ 方程式及び $\varepsilon$ 方程式により算出した。
計算アルゴリズム	—	擬定常解析 (TimeMarching 法)
移流項スキーム	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1次風上スキームは、非常に安定なスキームであるが数値粘性が大きく、速度分布がなまる傾向にあるので使うべきではない。</li> <li>• 少なくとも2次精度以上のスキームを用いるべきである。</li> </ul>	中心差分(2次精度)+1次風上差分のハイブリッドとした。 (中心差分:1次風上差分 =0.75:0.25)

項目	ガイドラインでの記載事項	本予測での設定等
収束判定	<ul style="list-style-type: none"> <li>十分解が収束していることを確認してから、計算を打ち切る必要がある。そのためには関心のある位置の諸量をモニタリングしたり、異なる計算ステップでのコンター図を重ね合わせたり、結果を可視化するなどして、解が変化しないことを確認するべきである。</li> </ul>	誤差が 0.0001 となった時点で収束と判定した。
初期条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>収束解を早く得るためには、物理的により妥当な初期条件を与えることが望ましい。</li> </ul>	本予測では風速初期条件として所定のべき乗則を与えてた。
乱流モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>現在、実務的な CFD 解析で最もよく用いられる乱流モデルは標準 <math>k-\epsilon</math> モデル及びその改良型モデルである。</li> <li>本書で説明した多くの改良型 <math>k-\epsilon</math> モデル、DSM では、上記の標準 <math>k-\epsilon</math> モデルの問題点が解消されており、多くの場合、地表面近傍の強風領域の予測精度が向上する。</li> </ul>	標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。
解析結果の信頼性	<ul style="list-style-type: none"> <li>本ガイドブックに掲載されているベンチマークモデルの単体モデルと市街地モデルを、ベンチマークで規定された計算条件を用いてそれぞれ最低 1 ケースは解き、本ガイドブックに示されている実験結果や解析結果と比較することが望ましい。</li> </ul>	ガイドブックに沿った市街地モデル(立方体 9 個、80 個の 2 ケース)との比較検証を行っている。
結果の表示方法(風速分布)	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準点の風速に対する割合として、各点の風速を風速比として示しておけばよい。</li> <li>風速の大きさを矢印のベクトルで風向とともに表示するとわかりやすい。</li> </ul>	基準点の風速に対する各点の風速比を、矢印のベクトルで風向とともに表示した。
乱れ成分	<ul style="list-style-type: none"> <li>CFD では、平均風速だけでなく乱流エネルギー等の速度変動に関する情報も得ることができるため、これも表示しておくことが望ましい。</li> </ul>	本予測では表示していない。
解析条件の明示	<ul style="list-style-type: none"> <li>CFD による解析結果とともに、解析で使用した計算メッシュ、各種の境界条件や使用したモデル、パラメータについて全て記載するべきである。</li> </ul>	<p>計算メッシュについては準備書に図示した。</p> <p>その他の条件、モデル、パラメータについても、評価書において本表の内容を追記し、準備書を修正する。</p>

## 2. 流入境界条件

流入境界条件に与えた乱流エネルギー $k$ の分布は、図1のような風洞実験値を参考に設定することも可能であるが、乱流エネルギーのプロファイルは周辺の地盤や構造物の状況で大きく異なる場合があるので、本予測では図2より、地表面粗度区別の乱流強度 $Lz(=\sigma/U)$ の観測例と指針値から、25%とした。

散逸率 $\epsilon$ も $k$ に準じて設定する。

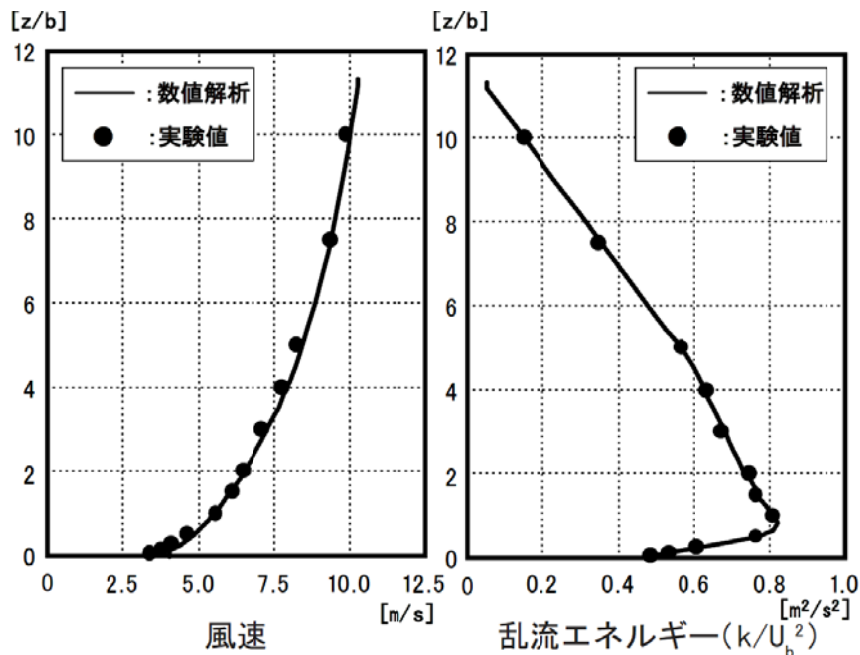
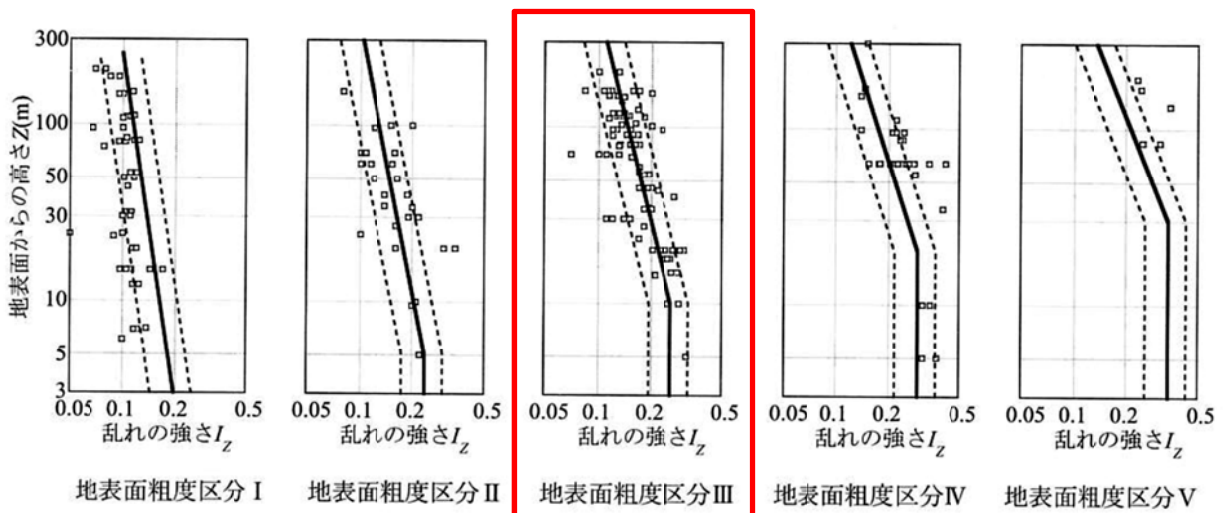


図1 風速、乱流エネルギーの鉛直分布に対する風洞実験値



資料:「建築物荷重指針・同解説」(日本建築学会、2015年2月)

図2 乱れの強さ $Lz$ の観測例と指針値



### 3. 壁関数

一般に、層流底層から乱流域の主流方向への接線方向風速は壁法則に支配されると考えられる。本解析では、べき乗則（風工学における鉛直風速プロファイルのべき乗則とは異なる）より比較的精度が良いとされる対数則を壁関数に使い、境界第一セルの風速値を設定し、壁法則を実現している。壁関数設定の考え方を図2に示す。

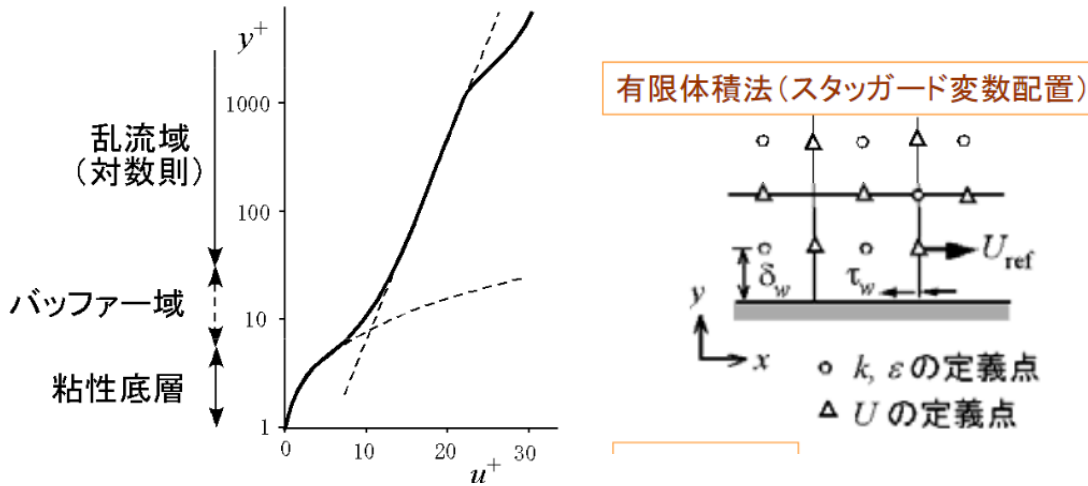
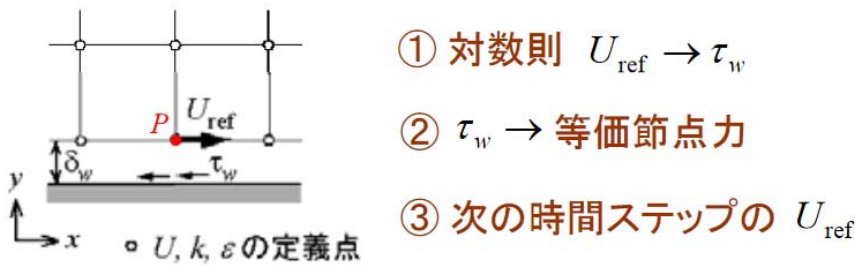


図2 壁関数設定の考え方

境界第一セルの風速値は、図3に示すように対数則から壁面接線応力  $\tau_w$  を計算し、次の時間ステップの風速値を推算する。



#### Launder の2層モデル

$$\tau_w = -\frac{C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\kappa} U_{\text{ref}} \quad (y^+ \geq y_c^+)$$

$$\tau_w = -\mu \frac{U_{\text{ref}}}{\delta_w} \quad (y^+ < y_c^+)$$

$$y^+ = \frac{C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} \delta_w}{\nu}$$

$$C_E = 9.793$$

$$y_c^+ = 11.63$$

#### 参照点の $\epsilon$

$$\epsilon_P = \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{\kappa \delta_w}$$

図3 境界第一セルの風速値算出方法

● 準備書 p. 8. 8-10 の修正 (朱書きが訂正内容を表しています。)

イ. 計算方法

圧力や温度により膨張・圧縮される圧縮性流体について、取り扱う範囲での圧力や温度による密度変化が小さい場合、非圧縮性流体として近似することができる。本予測で取り扱う流体である空気もマッハ数(音速との速度比)が0.3以下であれば非圧縮性流体として取り扱っても問題ないとされている。

流体の挙動については、非圧縮性流体での質量保存則を意味する連続の式、粘性流体での運動方程式を意味する Navier-Stokes の式、エネルギー保存を意味するエネルギー方程式 ( $k$  方程式及び  $\varepsilon$  方程式) の3つの物理方程式を解くことで求めた。各方程式を数値解析するため、計算領域を有限個の小領域に分割し、小領域への流入量、流出量から解析解を求める有限体積法を用いた。

基礎方程式は以下のとおりである。

また、計算モデルの基本構成を表8.8-7に示す。

- ・ 質量保存式 (連続の式)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

- ・ 運動方程式 (Navier-Stokes の式)

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \langle u_i u_j \rangle \right)$$

- ・  $k$  方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \langle u_i u_j \rangle \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon$$

- ・  $\varepsilon$  方程式

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) - C_1 \frac{\varepsilon}{k} \langle u_i u_j \rangle \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$

ここで、 $-\langle u_i' u_j' \rangle$  の予測式

$$-\langle u_i' u_j' \rangle = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

$\langle f \rangle$  : 変数  $f$  のアンサンブル平均

$x_i$  : 座標成分 (添字の  $i, j (=1, 2, 3)$  は座標  $x, y, z$  方向を示す。)

$u_i$  : 変動流速成分

$U_i$  : 平均流速成分  
 $\rho$  : 流体の密度  
 $p$  : 圧力  
 $t$  : 時間  
 $\nu$  : 動粘性係数  
 $\nu_t$  : 乱流動粘性係数  
 $k$  : 乱流エネルギー =  $\frac{(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)}{2}$   
 $\varepsilon$  : 粘性散逸率 =  $\nu \left\langle \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\rangle$   
 $\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$   
 $C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$

表 8.8-7 計算モデルの基本構成

項目	構成
微分方程式離散化手法	有限体積法
取扱流体	粘性流体
座標系	直交座標
時間積分	SMAC 法
マトリックス解法	速度, 温度 - Jacobi 法 圧力 - 改良 Gauss Seidel 法
移流項スキーム	中心差分 (二次精度) と一次風上差分のハイブリッド (中心差分 : 1次風上差分 = 0.75 : 0.25)
解析時間	計算開始から定常に至るまで計算する