

# 台風シミュレーションと気象解析を利用した 設計風速と階級別風速出現頻度推定手法の提案

An Assessment of the Design Wind Speed and Frequency Distribution of Wind Speed  
using Meteorological Simulation and Typhoon Simulation

山口 敦<sup>1)</sup> 石原 孟<sup>2)</sup>  
Atsushi YAMAGUCHI<sup>1)</sup> Takeshi ISHIHARA<sup>2)</sup>

## ABSTRACT

In this study, an assessment of the external design wind conditions by using numerical simulation was carried out. The frequency distribution of mean wind speed was estimated by using mesoscale meteorological model and microscale model. The estimated frequency distribution shows good agreement with the measurement. The extreme wind speed with the recurrence period of fifty years was estimated by using typhoon simulation. Two methods were compared for the estimation of the extreme wind speed from the annual maximum wind speed of ten thousand years of typhoon simulation. The extreme wind speed obtained from one hundred year's annual maximum wind speed shows closer value to the conventional extreme wind speed estimated from relatively short measurements. On the other hand, the extreme wind speed obtained from ten thousand year's annual maximum wind speed represents the statistical extreme wind speed with the recurrence period of fifty years and shows slightly smaller value than the other one.

Key Words: Design Wind Condition, Mesoscale Model, Microscale Model, Typhoon Simulation

## 1. はじめに

風車の設計においては、種々の外部環境条件を設定する必要がある。風に関する外部環境条件の中で重要なものとして、風車が終局荷重に対して安全かどうかを照査するための50年再現期間の設計風速、疲労荷重に対して安全かどうかを照査するための風速出現頻度分布がある。

IEC61400-1<sup>1)</sup>においては、50年再現期間の設計風速を決定する手法として、MCP法<sup>2)</sup>によって近傍の気象台等のデータから推定する方法や長期観測データに基づきガンベル解析を実施する方法が規定されている。しかし、複雑地形上や洋上など、近傍に風速の相関の高い気象官署が存在しない場合にはMCP法を用いることはできないのに加え、風力発電設備の設計のために長期観測を実施することは現実的でない。

本研究ではこれらの問題を解決するために、現地観測データを必要としない数値シミュレーションにより設計風速と風速階級別出現頻度を推定する手法を提案する。メソスケール気象解析と局所風況予測モデルにより風速階級別出現頻度を、台風シミュレーションにより50年再現期間の設計風速を推定し、千葉県銚子気象台における観測データを用いて検証する。

## 2. 解析手法

### 2.1 気象シミュレーション

季節風は、総観スケールの気圧配置を駆動力とする一般風が地表面粗度、地形、成層、熱による局所循環の影響を受けて形成される。本研究では銚子気象台周辺の季節風特性を明らかにするために、力学的局所化手法<sup>3)</sup>に基

1),2) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 助教, 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

づき、気象シミュレーションを実施した。図1に力学統計的局所化手法の流れを示す。

まず全球モデルの客観解析値を初期・境界条件とし、メソスケール気象モデル RAMS<sup>4)</sup>により、ナッジングによるデータ同化手法を用いて、1年間にわたる時系列解析を行い、水平2kmの解像度をもつ1年分の時系列風速データを作成する。

メソスケール気象モデルにより求めた風速データには海陸風、山谷風などの局地循環、大気成層による局地風、水平スケール2km以上の地形や地表面粗度変化による影響が含まれているが、2km以下のスケールの詳細地形の影響は含まれていない。このため、水平解像度2km以下のスケールの微細地形の影響を考慮する手法に関しては、後述する。

## 2.2. 台風シミュレーション

台風やハリケーンによる強風を設計風速に取り込む手法として、モンテカルロシミュレーションによる台風シミュレーションが提案されている。台風シミュレーションは、台風を数個の台風パラメータでモデル化し、過去の台風経路・強度等から対象地点における台風パラメータの出現確率とパラメータ間の相関をモデル化する。次にモデル化した出現確率と相関を満足するような台風パラメータの組を、対象地点近傍において長期間の台風を人為的に発生させる。最後に発生させたそれぞれの台風に対して、対象地点における平坦で粗度が一定と仮定した場合の地表面の風速の時系列を推定する。

本研究では、石原らにより提案された改良台風シミュレーション手法<sup>5)</sup>(図2)を用いて1万年分の台風シミュレーションを実施する。まず、台風パラメータを同定するために対象地点の半径500kmを通過し中心気圧が985hPa以下となった過去の台風を気象庁ベストトラックデータから抽出する。次に、それぞれの台風に対して、対象地点最接近時の中心気圧低下量、最大旋衡風速半径、進行速度、進行方向、最接近距離及び年発生頻度を抽出し、各パラメータを確率分布モデルでモデル化する。この時、中心気圧、最大旋衡風速半径、進行速度はIshihara et al.<sup>6)</sup>によって提案された混合確率分布で、進行方向は正規分布で、最接近距離は2次関数で、年間発生個数はポワソン分布でモデル化する。さらに、各パラメータが求めた出現確率分布と相関を満たすような台風を1万年にわたり発生させ、傾度風の仮定により各台風による上空風速を推定する。最後に、平坦地上風速・風向は、Ishihara et al.<sup>6)</sup>によって提案された台風モデルを用いて、地表面粗度区分がIIであり、平坦な地形上の風速を推定した。このモデルでは、台風時の大気境界層内の風速分布 $u_T(z)$ と風向分布 $\theta_T(z)$ は次のように求める。

$$u_T(z) = u_G(z/Z_G)^{\alpha_u} \tag{1}$$

$$\theta_T(z) = \theta_G + \theta_S(1.0 - 0.4(z/Z_G))^{1.1} \tag{2}$$

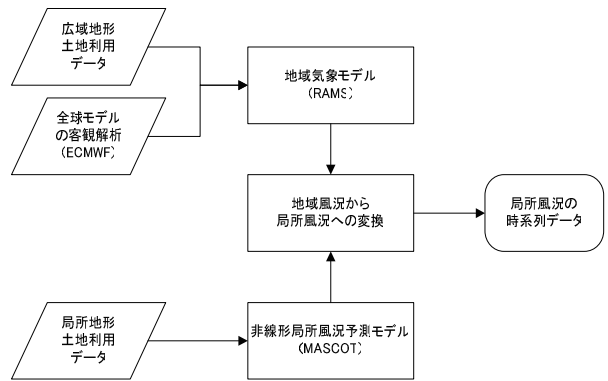


図1 力学統計的局所化手法の流れ

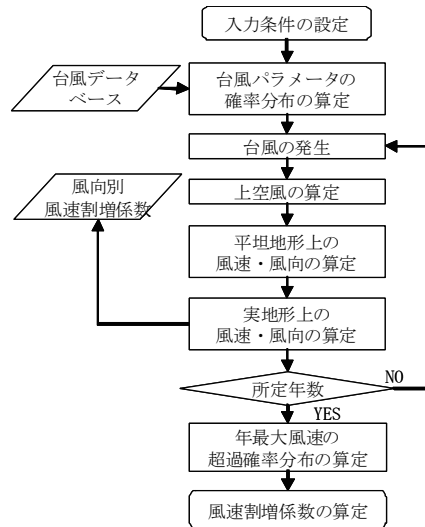


図2 台風シミュレーションの流れ

ここで、 $z = 0.01$  は粗度区分 II に対応する粗度長、 $U_G (= \sqrt{v_{\theta G}^2 + v_{rG}^2})$  は傾度風であり、台風シミュレーションにおいて傾度風の仮定により求めた上空風速がこれに相当すると仮定する。 $Z_G$  は傾度風高さ、 $z$  は地表面からの高さ、 $\alpha_u$  は鉛直プロファイルを表すべき指数、 $\gamma_s$  は風向の偏角である。またこれらのパラメータは傾度風  $U_G$ 、地表面粗度長  $z_0$ 、絶対渦度  $f_\lambda$ 、渦度の非一様性を表すパラメータ  $\xi$  を用いて以下のように表すことができる。

$$\alpha_u = 0.27 + 0.09 \log z_0 + 0.018 \log^2 z_0 + 0.0016 \log^3 z_0 \quad (3)$$

$$Z_G = 0.06(U_G / f_\lambda)(\log R_o\lambda)^{-1.45} \quad (4)$$

$$\theta_s = (69 + 100\xi)(\log R_o\lambda)^{-1.13} \quad (5)$$

ここで、 $R_o (= U_G / f_\lambda z_0)$  は地表ロスビー数とよばれる無次元数である。この式は、台風の気圧場と対象地点周辺の地表面粗度が明らかになれば、台風時の任意高さの地上風の風向・風速が、式(1)～式(5)を用いることによって求められる。このようにして求めた風速は、地形が平坦で粗度区分 II 上の風速に相当するため、実地形上の風速を求めるためには局所地形の影響を考慮する必要がある。その手法については後述する。

### 2.3 局所地形の影響の考慮

前々節でメソスケール気象モデルにより求めた風速場は、メソスケール気象モデルの解像度に対応したものであり、前節で台風シミュレーションにより求めた風速場は地形が平坦で一樣粗度区分 II に対応するものである。これらの風速場を詳細な局所地形を考慮した実地形上の風速場に変換するため、本研究では局所風況予測モデル MASCOT<sup>7)</sup>を用いた。

局所風況予測モデル MASCOT による数値シミュレーションにより、次式に示すように平坦で粗度区分一樣な地形と実地形上との間の風速比と風向偏角を風向の関数として求めることができる。

$$C_i(x, y, z, \theta_f) = \frac{\tilde{u}_i(x, y, z, \theta_f)}{\tilde{u}_f(x, y, z, \theta_f)} \quad (6)$$

$$D_i(x, y, z, \theta_f) = \theta_i(x, y, z, \theta_f) - \theta_f \quad (7)$$

ここで、 $\tilde{u}_i(x, y, z, \theta)$ 、 $\tilde{u}_f(x, y, z, \theta)$  はシミュレーションにより求めたそれぞれ実地形上、平坦地形上の風速であり、 $\theta_i(x, y, z, \theta)$ 、 $\theta_f(x, y, z, \theta)$  は同様の風向である。

台風シミュレーションにより求めた平坦地形上の風速・風向をそれぞれ  $u_T(t)$ 、 $\theta_T(t)$  とすると、台風時の局所地形を考慮した風速・風向は

$$u_L(x, y, z, t) = u_T(t) \times C_i(x, y, z, \theta_T(t)) \quad (8)$$

$$\theta_L(x, y, z, t) = \theta_T(t) + D_i(x, y, z, \theta_T) \quad (9)$$

と求めることができる。なお、台風シミュレーションによって推定される風速は3時間平均相当なので3時間平均風速と10分平均風速の差の標準偏差が、3時間平均風速の10%と2.6m/sの最小値であるとし、乱数を用いて10分平均値相当の最大値を推定した。

メソスケール気象モデルにより推定した風向・風速を局所地形を考慮したものに交換する際には、(6)(7)式に示した風速比・風向偏角に加え、(10)(11)式に示す粗い地形上の風速比・風向偏角が必要である。

$$C_c(x, y, z, \theta_f) = \frac{\tilde{u}_c(x, y, z, \theta_f)}{\tilde{u}_f(x, y, z, \theta_f)} \quad (10)$$

$$D_c(x, y, z, \theta_f) = \theta_c(x, y, z, \theta_f) - \theta_f$$

ここで、 $\tilde{u}_c(x, y, z, \theta)$ 、 $\theta_c(x, y, z, \theta)$  はそれぞれメソスケール気象モデルと同じ解像度の地形・粗度を用いて実施した MASCOT によるシミュレーションにより求めた風速・風向である。メソスケール気象モデルによって推定された風速・風向をそれぞれ  $u_M(t)$ 、 $\theta_M(t)$  とし、実地形上の風速を次式により求める。

$$u_l(x, y, z, t) = u_M(t) \times \frac{C_t(x, y, z, \theta_U(t))}{C_c(x, y, z, \theta_U(t))} \quad (12)$$

$$\theta_L(x, y, z, t) = \theta_M(t) + D_t(x, y, z, \theta_U) - D_c(x, y, z, \theta_U) \quad (13)$$

ここで  $\theta_U$  はメソスケールから求めた上空の風向である。

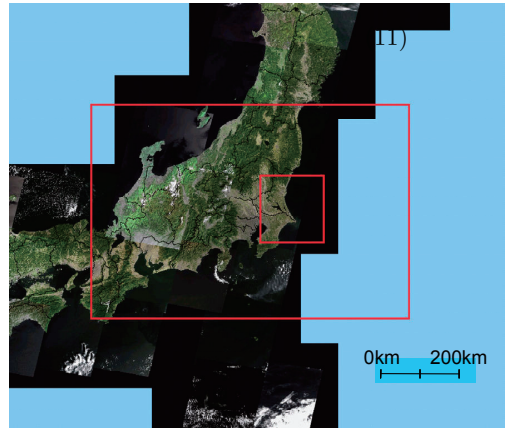


図3 メソスケール気象モデルの解析領域

### 3. 銚子気象台における設計風速の評価と検証

本章では、千葉県銚子気象台を対象とし、前章で述べた風速予測手法の検証を行い、50年再現期間の設計風速と風速別出現頻度などの設計風条件を評価する。

#### 3.1 気象シミュレーションによる風速階級別出現頻度推定

関東地方を含む気象現象を再現するため、本研究では図3に示すようなメソスケール気象モデルの解析領域を設定した。外側の領域1は格子間隔10kmで、関東地方とその周辺の山岳地帯を覆う領域とし、内側の領域2は銚子近傍の海域を含む領域とした。本研究では、全球モデルの客観解析値 (ECMWF Operational Analysis データ) を初期・境界条件とし、2000年1年間にわたる時系列解析を行い、水平1kmの解像度をもつ1年分の時系列風速データを作成した。次に作成した時系列風速データを前節に述べた手法により、局所風況予測モデル MASCOT を利用して局所地形を考慮した風に変換した。図4に局所風況予測モデル MASCOT の解析領域を、図5に MASCOT から求めた風速比を示す。

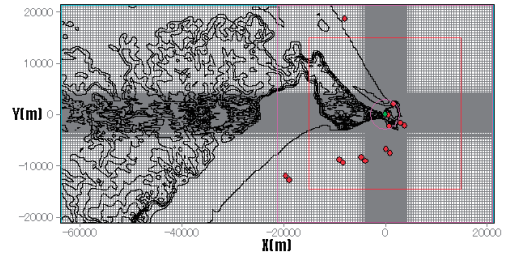


図4 局所風況予測モデルの解析領域

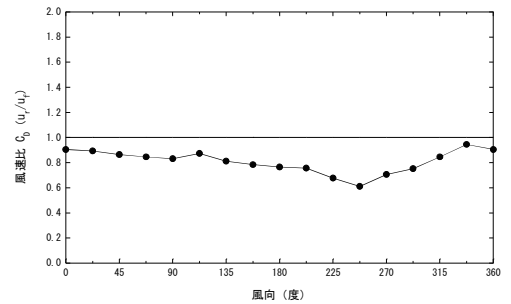


図5 銚子気象台における風速割増係数

このようにして求めた銚子気象台における2000年の日平均

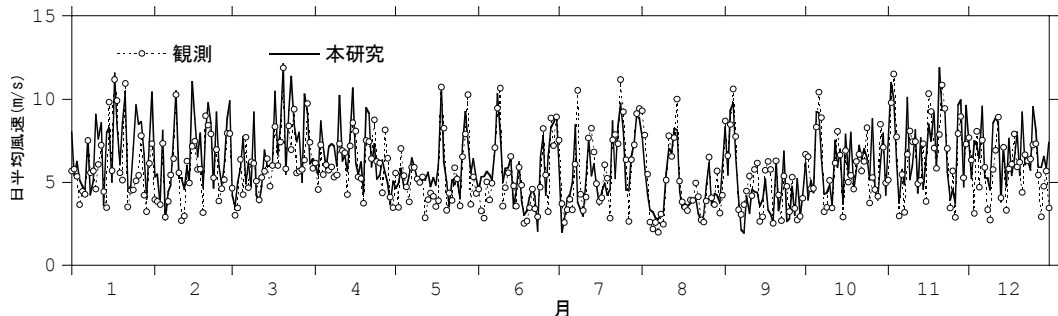


図6 銚子気象台における2000年の日平均風速

風速を観測値と比べたものを図 6 に示す。日平均風速の RMSE とバイアスはそれぞれ、1.57m/s, 0.38m/s であり、観測値とシミュレーション結果がよく一致していることがわかる。また、疲労荷重の算定に必要な風速階級別の出現頻度を同様に観測値と比べたものを図 7 に示す。風速階級別の出現頻度もよく一致していることがわかる。

### 3.2 台風シミュレーションによる設計風速の推定

本節では銚子気象台を対象に 1 万年の台風を発生させる台風シミュレーションを実施した。図 8 には、銚子気象台の半径 500km を通過し中心気圧が 985hPa 以下となった過去の台風を示す。これらの台風から 2 章で説明した手法に従って台風パラメータの確率分布を推定した(表 1)。次にこの確率分布に基づき、1 万年分の台風を発生させ、2 章に示した手法に従い、銚子気象台位置における、平坦で一樣粗度区分 II 上の風を推定した。さらに、局所風況予測モデル MASCOT による気流解析結果を用いて局所地形を考慮した風速・風向に変換した。

次に 1 万年の年最大風速を抽出し、50 年再現期待値を推定した。N 年間の年最大風速より、再現期間別の年最大風速を求めるためには通常、年最大風速の非超過確率の確率分布関数  $F(u)$  を用いる。非超過確率が  $1 - 1/N$  となる風速が N 年再現期間の風速となるため、横軸を  $F$ 、縦軸を  $u$  として  $F(u)$  をプロットすると、再現期間別の設計風速を求めるグラフとなる。ただし、年最大風速の非超過確率  $F$  と再現期間  $N$  との関係は、

$$N = \frac{1}{1 - F} \quad (14)$$

である。なお、一般的に横軸には  $F$  を直接用いるのではなく、基準化変数  $-\ln(-\ln(F))$  を用いることが多い。このような横軸を用いると、 $F(u)$  がガンベル分布に従う時にグラフ上で直線となる。50 年再現期待値に対応

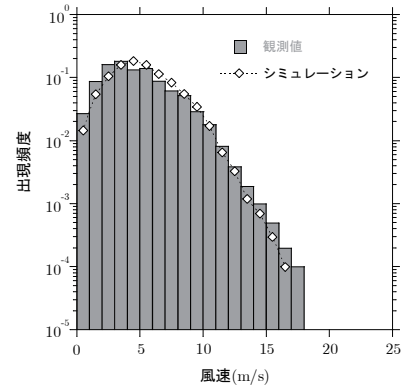


図 7 銚子気象台における風速階級別出現頻度分布



図 8 銚子気象台の半径 500km を通過した台風

表 1 各台風パラメータの確率分布関数およびモデルパラメータ

台風パラメータ		確率分布関数	モデルパラメータ
中心気圧低下量 $\Delta P$			$\mu = 1.58$ $\sigma = 0.114$ $k = 4.22$ $c = 43.7$ $a = 1.00$
最大旋衡風速半径 $R_m$	混合確率分布	$F_M(x) = a \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right] + (1 - a) \times \frac{k}{C} \left(\frac{x}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{C}\right)^k\right]$	$\mu = 2.10$ $\sigma = 0.246$ $k = 1.91$ $c = 163$ $a = 0.502$
進行速度 $C$			$\mu = 1.58$ $\sigma = 0.114$ $k = 4.22$ $c = 43.7$ $a = 1.00$
進行方向 $\theta$	標準正規分布	$F_S(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$\mu = 144$ $\sigma = 26.0$
最接近距離 $d_{\min}$	二次関数	$d_{\min} = z(x^2 - x) + 1000x - 500$	$z = 390$
年間発生数 $\lambda$	ポアソン分布	$\frac{\lambda^x \exp(-\lambda)}{x!}$	$\lambda = 2.77$



する基準化変数は

$$-\ln(-\ln(1 - 1/50)) = 3.90 \quad (15)$$

となるため、基準化変数 3.9 に対応する風速が、年最大風速の 50 年再現期待値となる。

本研究では、1 万年の年最大風速から 50 年再現期待値を求める際に 2 通りの手法を実施した。1 つ目は 1 万年分の年最大風速から風速の非超過確率を直接求める手法であり、もう 1 つは 1 万年の年最大風速を 100 個の 100 年分の年最大風速に分割し、それぞれの 100 年の年最大風速から非超過確率を計算し、それぞれの非超過確率から 50 年再現期待値を推定し、それらの平均を取ることにより最終的な 50 年再現期待値を推定する方法である。前者の手法は統計的に 50 年再現期待値の真値に近づく一方、後者は 100 年程度の観測データから推定した既往の値に近いことが期待される。

図 9 にそれぞれの手法により求めた年最大風速の非超過確率を示す。1 万年分の年最大風速から推定した非超過確率と比較して、100 年分の年最大風速から求めた非超過確率の平均値は観測値に近い値を示す。また、前者の手法により求めた年最大風速の 50 年再現期待値は 32.2m/s であり、後者の手法により求めたものは 33.1m/s である。これは、1 万年の中できわめて稀に発生する高風速の事象が、100 年の中でも必ず発生し、再現期間の短い場合にも現れるためである。これらのことから、長期のシミュレーションにより求めた年最大風速の 50 年再現期待値は従来の比較的短期間の観測値から求めたものと比較して低い値を示すことがわかる。

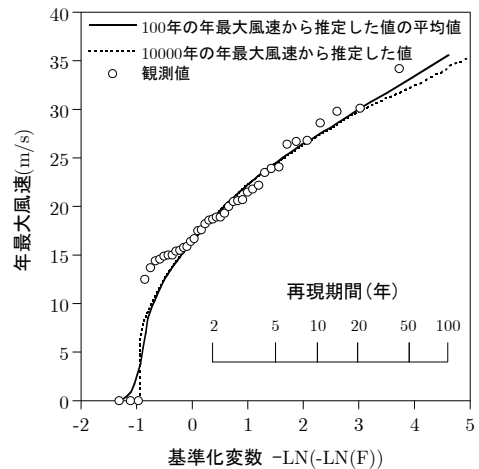


図 9 銚子気象台(粗度区分 II, h=10m)における台風時の年最大風速の確率分布

#### 4. まとめ

本研究では、気象シミュレーションと台風シミュレーションを用いて観測値が得られない場所における設計風条件を評価する手法を提案し、銚子気象台における観測データを用いて検証した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) メソスケール気象解析と局所風況予測モデルにより年平均風速と風速出現頻度分布を推定する手法を提案し、銚子気象台において検証した結果、予測値は観測値とよく一致する。
- 2) 台風シミュレーションにより年最大風速の非超過確立を推定する手法を提案し、銚子気象台において検証した。その結果、100 年分の年最大風速から求めた 50 年再現期待値の平均値は観測値とよく一致する。
- 3) 一方、1 万年の年最大風速から求めた 50 年再現期待値は、統計的な真値に近いと考えられるが、従来の比較的短期間の観測値から求めた値よりも小さな値となる。

#### 参考文献

- 1) IEC61400-1 Edition 3.0, Wind turbines – Part 1: Design requirements, 2005. 2) Derrick, A.: Development of the measure-correlate-predict strategy for wind site assessment, National Wind Turbine Center, NEL, UK, British Wind Energy Association, 1992. 3) 山口敦, 石原孟, 藤野陽三: 力学統計的局所化による新しい風況予測手法の提案と実測による検証, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.1, pp.110-125, 2006. 4) Pielke, R. A. Cotton, W.R., Walko, R. LO., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Welsey, D. A., Lee, T. J., and Copeland, J. H.(1992) A Comprehensive Meteorological Modeling System – RAMS, Meteorol. Atmos. Phys., 49, 69-91. 5) 石原孟, ホタイホーム, チョンチーリョン, 藤野陽三: 台風シミュレーションのための混合確率分布関数と修正直交変換法の提案, 第 18 回風工学シンポジウム論文集, pp.5-10, 2004. 6) Tekeshi Ishihara, Khoo Kai Siang, Cheong Chee Leong and Yozo Fujino, Wind Field Model and Mixed Probability Distribution Function for Typhoon Simulation, The 6th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Seoul, 2005. 7) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三: 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.195-211, 2003.