

# 実測と台風モデルの平均化時間の違いを考慮した台風シミュレーションによる 年最大風速の予測手法

## EXTREME TYPHOON WIND SPEEDS CONSIDERING DIFFERENCES IN THE AVERAGE TIME BETWEEN FULL-SCALE OBSERVATIONS AND TYPHOON MODEL

松井正宏\*<sup>1</sup>, 石原 孟\*<sup>2</sup>, 日比一喜\*<sup>3</sup>

*Masahiro MATSUI, Takeshi ISHIHARA and Kazuki HIBI*

In order to evaluate annual maximum wind speeds due to typhoons, a new probabilistic procedure was proposed in which differences in the average time between observations and calculations were considered. Comparing full-scale observations and wind speeds calculated from a typhoon model, it was found that the average time of the calculated wind speeds was much more than 10 minutes, and the calculated wind speeds did not include the small scale variation which was found in the observations. By introducing the probabilistic procedure into the Monte-Carlo technique, the calculated probability distribution for 10 minutes of mean annual maximum wind speed had better agreement with observations than those by the conventional approach which underestimated annual maximum wind speeds.

**Keywords:** *Typhoon, Design wind speed, Monte-Carlo method, Averaging time, Annual maximum wind speed*

台風, 設計風速, モンテカルロ法, 平均化時間, 年最大風速

### 1 はじめに

構造物の高層化や、大スパン化に伴い、風荷重の影響が支配的な建築物が増えつつある。風荷重の評価は、設計風速の設定、空気力学特性の評価、建築物の応答、クライテリアの照査と、様々なプロセスを経て実施されるが、この中においても設計風速の設定は、自然風の複雑さ故に、不確定さの大きい項目のひとつである。

現在の耐風設計で用いられている設計風速の設定方法<sup>1)</sup>は、主として過去の気象台記録の年最大風速を極値分布に当てはめる方法であるが、年最大風速の記録は最も長く観測を実施している気象台でも高々70年間(1997年現在)であり、数百年の再現期間の風速が要求される場合<sup>2)</sup>には、再現期間の外挿になってしまう。また、温帯に位置し、海洋に接近している地域では、耐風設計で対象となる強風の主要因が台風であることが多い。台風は、1年を周期として年間平均28個発生するが、ある一つの観測地点でみると、顕著な影響を与える台風は非常に少ない。これは、気象的には同等の条件にあっても、台風のコースによっては大きな風速が観測されないことがあることによるものである。このため、台風気圧場に関する統計量に比べ、1観測地点で得られる台風による強風に関する統計量は、き

わめて不安定である。

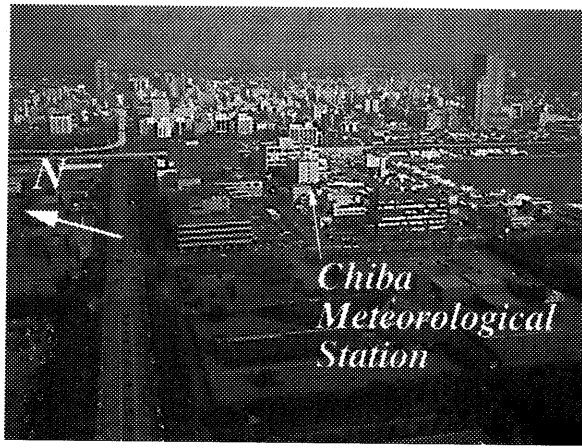
これらの問題を解決するためにRussell<sup>3)</sup>によって台風モデルを用いたシミュレーション手法が提案され、多くの研究者<sup>4)5)6)7)</sup>に使用されてきた。この手法では、過去に生じた台風の気圧場を表わす変数(年発生数、発生位置、中心気圧低下量、最大旋衡風速半径、移動方向、移動速度)の確率分布を調べ、その分布に当てはまる台風気圧場をモンテカルロ・シミュレーションにより多数発生させ、気圧場から地上風を予測して、対象地点の年最大風速の確率分布を求める。この方法により、これまで観測されていないような強風であっても、その地点の周辺を通過する台風の性質を考慮して、将来発生しうる顕著な強風も考慮でき、また、多数の風速の予測値を基に安定した年最大風速の分布を推定することができる。ただし、この手法の成否は、発生させる台風の気圧場の再現性と、地上風の予測精度に大きく依存する。

気圧場の統計モデルを作成するには対象地点周辺を通過する台風の数が多くが必要であるが、台風時の強風が顕著な地域では、十分な数の台風の記録が得られると考えられる。

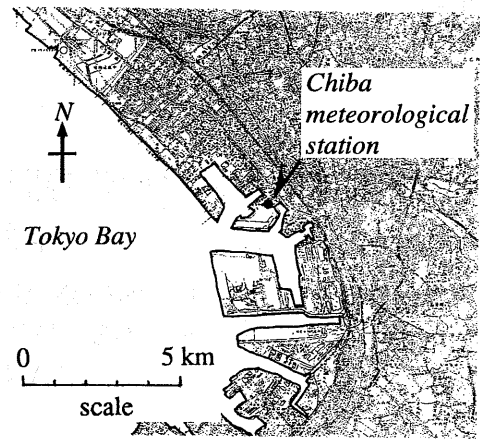
一方、地上風を予測するための方法は、従来、傾度風と地上風の

\*<sup>1</sup> 清水建設㈱技術研究所 研究員・工修  
\*<sup>2</sup> 清水建設㈱技術研究所 研究員・工博  
\*<sup>3</sup> 清水建設㈱技術研究所 主席研究員・工博

Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.  
Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.  
Chief Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.



(a) 千葉測候所周辺の状況(南南西から千葉測候所を臨む)



(b) 千葉測候所周辺地図

図 1: 千葉気象台位置とその周辺状況

表 1: 千葉気象台周辺の風向別粗度長

風向	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
粗度区分:初期	IV	IV	IV	IV	III	III	III	II	II	II	II	II	III	IV	IV	V
粗度長 (m)	1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	1	1	5.8
粗度区分:最終	IV+	IV+	IV+	IV	III+	III+	III+	IV	III	III	III	III	IV	IV+	V	IV+
粗度長 (m)	3	3	3	1	0.3	0.3	0.3	1	0.1	0.1	0.1	0.1	1	3	5	3

粗度区分は荷重指針<sup>1)</sup>の分類(I-V)に基づく。ただし、+記号はその区分を越え次の区分に満たないことを表わす。例えば、IV+は粗度区分IVとVの間であることを表わす。粗度区分とそれに対応する粗度長の関係は、荷重指針<sup>1)</sup>に示されるべき指数から式(5)を用いて求めた。

単一な風速比<sup>6)</sup>や、台風中心からの距離の関数となる風速比<sup>7)</sup>が、経験的に用いられてきた。しかし、これらの方法では、台風の物理的特性が考慮されておらず、観測地点周辺の地表面粗度に関する情報も反映することができない。これに対し、孟ら<sup>8)9)10)</sup>は台風時の大気境界層に対する理論的な考察を行い、風向別に地表面粗度を考慮できるモデルを導入して、地上風の予測精度を向上させた。このモデルを台風シミュレーションに適用し、実測との比較を行うのは興味のあるところである。

一般に、気象官署において実測された風速の平均化時間は10分と明確であるが、台風モデルを用いて計算された風速の平均化時間は明確ではない。実際に、これまでの台風モデルを用いたシミュレーションから求められた年最大風速は実測値に相当する値であるかどうかは不明である。そのため、台風モデルに対応する平均化時間の評価が重要となり、また、この平均化時間の影響を台風シミュレーションに反映させる必要がある。

以上の点を踏まえ、本研究では、孟らのモデルを台風シミュレーションに導入し、台風時の強風を求め、実測と比較することにより、その適用性を検討する。次に、実測とモデルによって予測された風速の平均化時間について考察し、平均化時間の違いが風速の予測値に及ぼす影響を検討する。さらに、この平均化時間の違いを考慮して台風時の最大風速とその確率分布を予測する手法を提案する。最後に、台風時の最大風速の確率分布を予測する手法をモンテカルロ・シミュレーションに導入する方法を定式化し、その計算結果と実測

結果を比較し、本手法の妥当性を検証する。

## 2 台風時の風速予測手法

### 2.1 台風気圧場のモデル

台風の気圧場を表わす式としてSchloemer<sup>11)</sup>の式(1)を用いる。

$$p(r) = p_c + D_P \cdot \exp(-R_M/r) \quad (1)$$

気圧場は台風中心からの距離 $r$ の関数で、気圧場の形状を決定する変数は、中心気圧 $p_c$ 、中心気圧低下量 $D_P$ 、最大旋衡風速半径 $R_M$ である。また、台風の移動に関する変数として台風の移動速さ $C$ 、進行方向 $\theta_T$ がある。これらのパラメータの決定方法は付録2に記した。

### 2.2 台風時の大気境界層のモデル

本研究では、台風時の風速場を予測するモデルとして孟ら<sup>9)10)</sup>の提案するモデルを用いる。このモデルでは、強風時の大気境界層の風速 $u(z)$ 、風向 $\gamma(z)$ は、次式の様に表わされる。

$$u(z) = u_G(z/z_G)^{\alpha_u} \quad (2)$$

$$\gamma(z) = \gamma_G + \gamma_S(1.0 - 0.4 \frac{z}{z_G})^{1.1} \quad (3)$$

ここで、鉛直座標 $z$ は次式<sup>8)</sup>で表わされるゼロ面変位 $d$ からの距離を表わす。

$$d = 0.75h \quad (4)$$

$h$ は粗度要素の平均的高さで、粗度長 $z_0$ を用いて、 $h = Az_0^{0.86}$ 、 $A = 11.4$ と表わされる<sup>8)</sup>。

式(2),(3)において、 $\alpha_u, z_G, \gamma_S$ はそれぞれ、鉛直プロファイルを表わすべき指数、傾度風高さ、偏角で、これらは、大気境界層の外部パラメータである、傾度風  $u_G$ 、地表面粗度長  $z_0$ 、絶対渦度  $f_\lambda$ 、渦度の一様性パラメータ  $\xi$  を用いて表わすことができる。それぞれのパラメータは以下の様に表わされる。

$$\alpha_u = 0.27 + 0.09 \log z_0 + 0.018 \log^2 z_0 + 0.0016 \log^3 z_0 \quad (5)$$

$$z_G = 0.06 \frac{u_G}{f_\lambda} (\log Ro_\lambda)^{-1.45} \quad (6)$$

$$\gamma_S = (69 + 100\xi)(\log Ro_\lambda)^{-1.13} \quad (7)$$

$$f_\lambda = \left( \frac{\partial u_{\theta g}}{\partial r} + \frac{u_{\theta g}}{r} + f \right)^{1/2} \left( 2 \frac{u_{\theta g}}{r} + f \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$\xi = \left( 2 \frac{u_{\theta g}}{r} + f \right)^{1/2} / \left( \frac{\partial u_{\theta g}}{\partial r} + \frac{u_{\theta g}}{r} + f \right)^{1/2} \quad (9)$$

ここに、 $Ro_\lambda (= \frac{u_G}{f_\lambda z_0})$  は、台風時の絶対渦度の影響を考慮した修正地表面ロスビー数である。また、傾度風 ( $u_{rg}, u_{\theta g}$ ) は、

$$u_{rg} = 0 \quad (10)$$

$$u_{\theta g} = \frac{C \sin \theta_r - fr}{2} + \sqrt{\left( \frac{C \sin \theta_r - fr}{2} \right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}} \quad (11)$$

と表わされる。ここでは、東を  $\theta = 0^\circ$  とし、反時計回りを正とする円筒座標系 ( $r, \theta$ ) を採用している。また、 $u_G, \gamma_G$  は、傾度風の風速、風向で、次式で表わされる。

$$u_G = \sqrt{u_{rg}^2 + u_{\theta g}^2} \quad (12)$$

$$\gamma_G = \theta_0 + \tan^{-1} u_{\theta g} / u_{rg} \quad (13)$$

ここで、 $f$  は Coriolis パラメータ、 $C$  は台風の移動速さ、 $\theta_0$  は台風中心から対象地点へ向かう角度、 $\theta_r$  は台風の中心から対象地点へ向かうベクトルを基準に台風の進行方向を表す角度 (台風の進行方向を  $\theta_T$  とすれば、 $\theta_r = \theta_T - \theta_0$ ) である。

風速と風向の鉛直分布を表わす式に含まれるパラメータ  $u_G, \gamma_G, z_0, f_\lambda, \xi$  は、いずれも、台風の気圧場または対象地点に関する情報から決定される値であり、気圧場と対象地点に関する情報から陽に決定することができる。

### 2.3 風向の補正

上述の風速場モデルでは風向を大きく変化させない程度の小さな地形の影響は等価な粗度として取り扱うことが可能である。しかし、風向に大きな影響を及ぼす大地形に対しては風向の補正を行う必要がある<sup>12)</sup>。実測値と計算値の風向に系統的な差が見られる場合、風向の計算値を次式で補正する<sup>13)</sup>。

$$\gamma_{CAL}(z) = D(\gamma_G) + \gamma(z) \quad (14)$$

ここで、 $D(\gamma_G)$  は実測値と計算値の間の風向偏差を表わし、傾度風風向  $\gamma_G$  の関数で表わす。

### 2.4 計算手順

上記より台風時の風向・風速を求めることができる。まず、式(1)により台風の気圧場を同定する。この気圧場から、式(12),(13)を用いて傾度風 ( $u_G, \gamma_G$ ) を求める。次に風向別粗度長  $z_0$  を設定し、地上風を式(2),(3)により求める。その際、必要であれば式(14)により風向の補正を行う。計算に必要なパラメータは式(4)-(9)から定める。

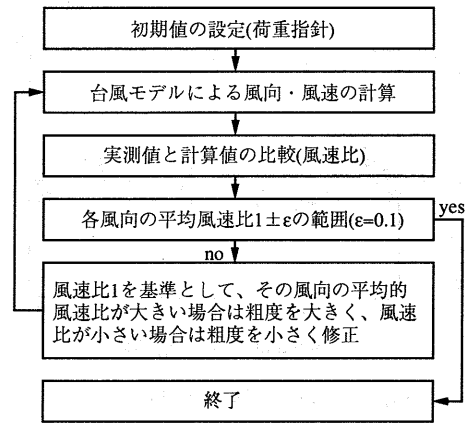


図 2: 風向別粗度長の設定方法

## 3 解析対象地点・風向別粗度区分の設定

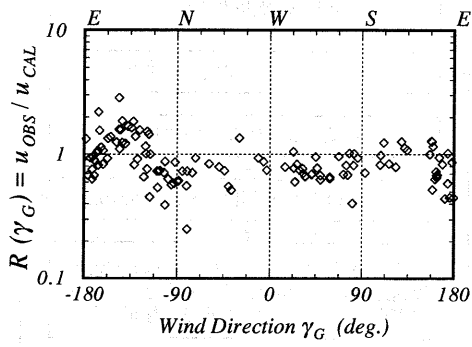
### 3.1 解析対象地点

図1に、本研究で解析対象地点とした千葉測候所の周辺の様子(付近の観光タワーからの鳥瞰)および周辺地図を示す。地表面利用状況を方位別に見ると、北東を中心とする風向は千葉市街が広がっており、その範囲は北西～北～北東～南東に及ぶ。南東から南にかけて臨海部の工場地帯であり、10数メートルの建築物が点在する。南～南西～西は海浜公園さらにその先は東京湾であり、粗度要素はあまり存在しない。西～北西は臨海部の工場地帯あるいは海岸となっている。これらのことから、千葉測候所では風向によって粗度が大きく変化することが予想される。

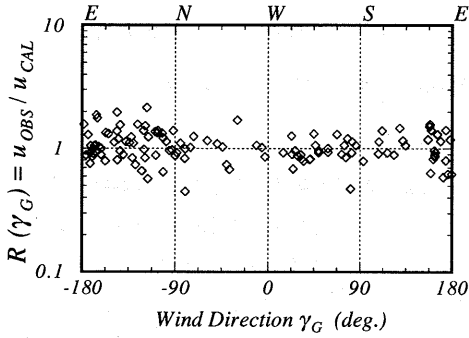
### 3.2 実測と計算の風速比を利用した周辺粗度区分の設定方法

実測値と計算値の風速比を用いて周辺粗度を設定する手順を図2に示した。まず、上述した対象地点周辺の地表面の情報から、荷重指針<sup>1)</sup>に掲載されている分類方法(写真、解説)を基に、16風向各々について粗度区分および対応する粗度長を決定する。表1の初期値の欄にこの結果を示す。次に、台風時の風速と風向を計算し、風向毎に実測値と計算値の比を求めた。この比が全風向に渡り平均的に1となるように、風向別粗度長を trial and error で修正した。具体的には、風速比が大きい場合は粗度を大きく、風速比が小さい場合は粗度を小さく修正する。この作業は各風向の平均的な風速比が  $1 \pm \epsilon$  ( $\epsilon = 0.1$ ) の範囲に収まったことを確認して終了する。

最終的に決定された粗度長とそれに対応する粗度区分を、表1に示す。また、風向別粗度長の初期設定値および最終的な決定値による風速比の傾度風風向による変化を図3に示す。風速比を参考にしながら決定された粗度区分は、南の風向を除き、その他の風向では、荷重指針<sup>1)</sup>を基に決定された粗度区分と比べて一区分以内の差である。このことは、荷重指針<sup>1)</sup>から求められる粗度区分は、実際の地表面の利用状況に対応しており、また、一般的に用いられる地表面粗度長を用いて台風時の鉛直分布を求める孟らの方法<sup>9)10)</sup>が妥当であることを示している。一方、風向別粗度長をある程度最適化した結果、風速比の分布はより1に近くなり、ばらつきはより小さくなっていることがわかる。



(a) 粗度区分の初期値を用いた場合



(b) 粗度区分の最終値(ある程度の最適化)を用いた場合

図 3: 風速比の傾度風 風向による変化

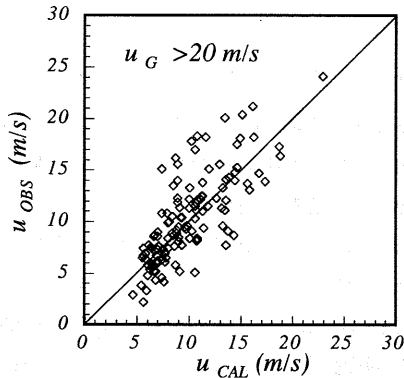


図 4: 台風時の風速の計算値と実測値の比較

風向は実測値と計算値の間に系統的な差(表 2)が見られたので、式(14)により補正した。風向偏差は中部山岳地(WSW-NW)の風向で大きく、山岳地を迂回し東京湾から吹き込む様な性質を示しており、関東地方を取り囲む大地形の影響等によるものと考えられる。

表 2: 風向偏差  $D(\gamma_G)$

風向 ( $\gamma_G$ )	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
偏差 ( $^\circ$ )	8	7	19	32	26	5	-5	2
風向 ( $\gamma_G$ )	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
偏差 ( $^\circ$ )	9	12	22	39	42	28	15	11

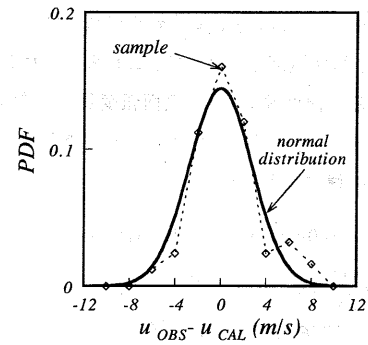


図 5: 風速予測残差の分布

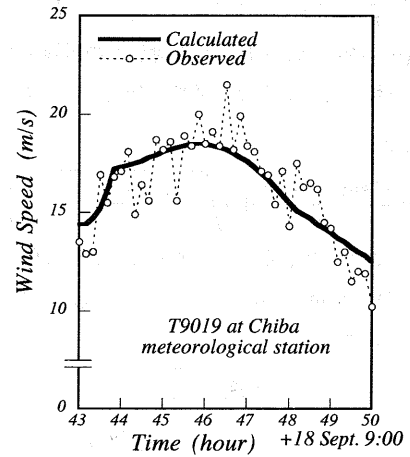


図 6: 台風時の風速の計算値と実測値の時刻歴の比較 (T9019)

#### 4 台風時の風速のシミュレーションと実測値の比較

式(2),(3)を用いた台風時の風速の計算値と実測値の関係を図 4 に示す。ただし、本研究では強風を対象としていることを考慮して、計算による傾度風速  $u_G$  が  $20\text{m/s}$  以上のものを選択した。計算風速と実測は良い対応を示している。図 4 における計算値と実測値の差を求めると、図 5 に示すような分布となり、その標準偏差は  $2.6\text{m/s}$  である。図中の太実線は、平均  $0\text{m/s}$ 、標準偏差  $2.6\text{m/s}$  の正規分布である。台風時の風速の計算値と実測値の差は正規分布に近い分布となっていることがわかる。計算値と実測値の差が生じる原因を明らかにするために、時刻歴での風速の比較を行った。

図 6 に台風 9019 号の最大風速発生時刻付近の風速の実測値と、台風モデルによる予測値の時刻歴(太実線)の比較を示す。この図から、台風時の気圧場から推定した風速に比べ、実測される風速(10 分間平均風速)は大きく変動していることがわかる。これは、気圧場を近似する関数が台風スケールの渦運動のみを表していることによると思われる。実際の台風には台風スケールの大きな渦運動以外に、積乱雲に代表される小さな渦運動も含まれている。この場合、実測される 10 分間平均風速には、台風スケールと、さらにそれよりも小さなスケールの渦運動の影響が含まれる。いま、実測された風速が  $25\text{m/s}$  であったとすると、10 分間に相当する長さのスケールは、 $15\text{km}$  である。一方、台風モデルによって表わされる風速の変動の長

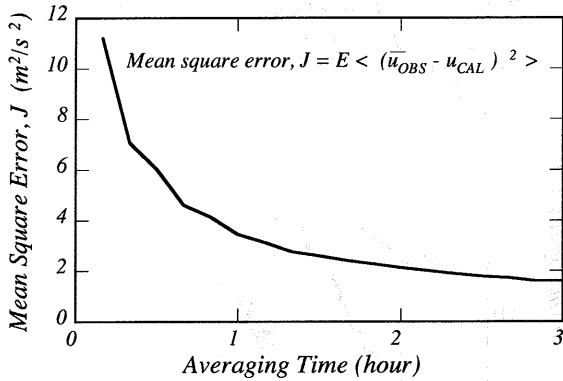


図 7: 実測値の移動平均に伴う平均二乗誤差の変化 (T9019)

さスケールは最大旋衡風速半径のオーダー (100km 程度) である。この場合、台風モデルが表わしている空間スケールは 10 分間平均風速が代表する空間スケールの約 6.6 倍であり、時間スケールに変換すると約 1 時間に対応する。Vickery ら<sup>15)</sup> はハリケーンのシミュレーションの計算結果の平均化時間はおよそ 1 時間であろうと推察している。しかし、定量的な検討が十分にされていないので、以下の検討を行った。

実測される風速と台風モデルにより求められる風速の平均化時間の違いをより定量的に表わすために、図 6 において実測された風速の平均化時間を変化させて求めた値と計算値との差異を次式で定義される平均二乗誤差  $J$  の変化として求めた。

$$J = E\langle (\bar{u}_{OBS} - u_{CAL})^2 \rangle \quad (15)$$

ここで、 $\bar{u}_{OBS}$  は実測値に移動平均を施したもの、 $u_{CAL}$  は式 (2) から求めた計算風速、 $E\langle \rangle$  は観測時間 (ここでは 7 時間) にわたる平均操作を表わす。図 7 に平均二乗誤差  $J$  と平均化時間との関係を示した。実測値の平均化時間が長くなるにつれて、平均二乗誤差が小さくなるのがわかる。平均二乗誤差の減少は平均化時間が 10 分～1 時間の範囲で急激になるが、極小点は見られず、平均化時間の増加とともに平均二乗誤差は徐々に減少する。このことから、台風モデルによる計算値の平均化時間は実測値の 10 分という値に比べ非常に長い時間に相当することが分かった。

## 5 平均化時間の違いを考慮した最大風速の予測方法

### 5.1 台風時の 10 分間平均最大風速の予測

上述のように現在の台風モデルにより求めた風速の平均化時間は実測される風速の平均化時間 (10 分間) よりはるかに長い。この問題を解決するためには、気圧場を表す関数をより高次にし、スケールの小さい渦運動による気圧変化を表現して、計算風速の平均化時間を 10 分間に近づける方法が考えられる。しかし、気圧場を表す関数を複雑にすることは、同定すべき変数が増え、大量の計算が要求されるモンテカルロ・シミュレーションには不向きである。また、変数の物理的な意味も曖昧になってしまう。

一方、平均化時間の違いを確率的に取り扱う方法も考えられる

<sup>14)</sup>。この方法では、10 分間平均風速の値を直接求めることをやめ、10 分間平均風速のとりうる確率分布を求める。本研究で対象とする設計風速は、その確率分布が与えられれば、想定する再現期間から対応する風速を決めることができるので、本手法は有効である。

前節で示したように、台風モデルから求められる計算値と実測された 10 分間平均風速の間には差が存在した。つまり、実測値はばらつきが大きく、緩やかに変動する計算値を中心に分布する関係となっている。これは、実際の台風の気圧場は積乱雲の様な小さなスケールの空間的な変動を有するのに対し、台風モデルで使用している気圧場は軸対称な ( $\theta$  方向に空間変動を持たない) アンサンブル平均的な構造であることによると考えられる。この気圧場から計算される風速もまたアンサンブル平均を施したような性質を持ち、実測値は計算値を中心として変動を有すると考えられる。事実、Kurihara ら<sup>16)</sup> が行った tropical cyclone に対する 3 次元の数値計算を見ると、地表付近の風速は、 $\theta$  方向のアンサンブル平均値に対し、風速は 2～3m/s のオーダーの空間変動値を有している。

これらのことから、本研究では、実際の 10 分間平均風速のとりうる値は、各時間において、台風モデルから求められる計算値を平均値とする正規分布で与えられると仮定する。そして、台風時の 10 分間平均風速の最大値の確率分布を求めることにする。その手順を以下に示す。

1. ある台風の風速を 10 分間毎に式 (2) により計算したものを  $u_j$  ( $j$  は時刻  $t$  を表す指標、 $t = j\Delta t$ :  $\Delta t = 600s$ ) とする。
2. 10 分間平均風速は計算風速  $u_j$  を中心として不規則な変動を有し、その変動の範囲は確率分布  $F_j(u)$  で表される。ここで、 $F_j(u)$  は次式のような正規分布を仮定する。

$$F_j(u) = N(u_j, \sigma_{u_j}^2) \quad (16)$$

ここで  $N(u_j, \sigma_{u_j}^2)$  は平均値  $u_j$ 、標準偏差  $\sigma_{u_j}$  の正規分布を表す。 $\sigma_{u_j}$  の値は平均化時間の違いによること以外に、風速の大きさなどに依存すると考えられるが、ここでは、図 5 から  $\sigma_{u_j} = 2.6m/s$  と仮定した。

3. 台風時の 10 分間平均最大風速の確率分布  $F_T(u)$  は次式で示される<sup>17)</sup>。

$$F_T(u) = P(u_1 \leq u, u_2 \leq u, \dots, u_n \leq u) \\ = \prod_j F_j(u) \quad (17)$$

ここで、各 10 分間の分布  $F_j(u)$  は互いに独立と仮定した。

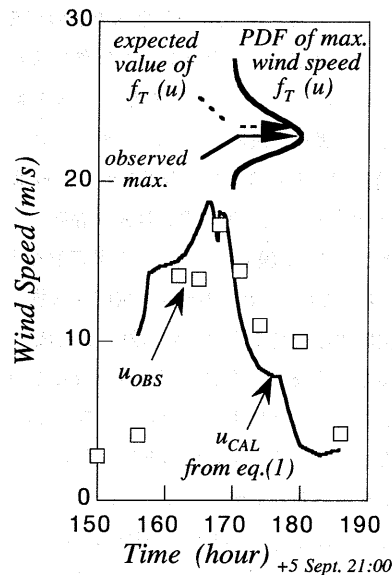
4. ある台風における 10 分間平均風速の最大値の期待値は次式で表わされる。

$$U_E = \int u f_T(u) du \quad (18)$$

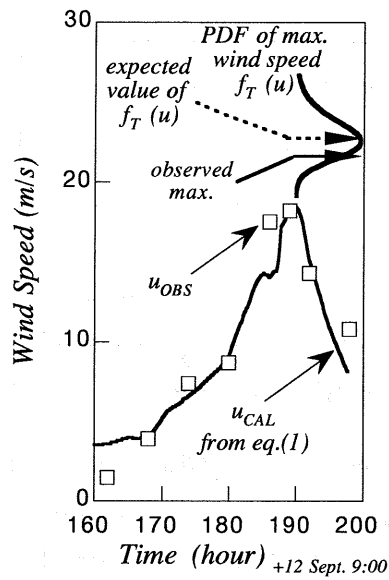
ここで、 $f_T(u) (= dF_T(u)/du)$  は式 (17) による最大風速  $F_T(u)$  の確率密度である。

### 5.2 台風時の最大風速の予測値と実測値の比較

千葉測候所における台風時の風速について最大風速の分布と実測値を比較する。図 8(a), (b) に台風時の風速時刻歴の式 (2) による計



(a) T8218



(b) T9019

図8: 台風時の計算風速の時刻歴と提案手法による最大風速の確率分布(実測値に時刻歴、最大値を併記した。)

算値と実測値を示した。同図中には式(17)による予測最大値の確率密度  $f_T(u)$ (実線)と、最大風速の期待値  $U_E$ (点線)および実測値の最大値(矢印)を併記した。式(18)により求めた平均化時間が10分間に対応する最大風速の予測値は式(2)で求めた風速の最大値よりかなり大きくなり、実測値の最大値に近い値を示す。

平均化時間の違いが最大風速の予測値に及ぼす影響を明らかにするため、さらに多くの台風に対し解析を行い、その結果を図9(a),(b)に示した。図9(a)は平均化時間の違いを考慮しない場合、すなわち、式(2)による計算値の最大値と実測値とを比較した結果であり、図9(b)は平均化時間の違いを考慮した場合、すなわち、式(18)で示される最大風速の期待値と実測値とを比較した結果である。平均化時間の違いを考慮していない場合(図9(a))は、実測値は殆どの場合、計算値より大きい。一方、平均化時間の違いを考慮した場合(図9(b))は、図中の点線で示した回帰式からわかるように、式(18)で求めた最大風速の期待値が実測された風速の最大値を偏り無く予測していることが分かる。

以上のことから、平均化時間の違いを考慮しない場合は台風時の最大風速を過小評価することが明らかとなった。このことは、モンテカルロ・シミュレーションにおいても年最大風速を過小評価する可能性があることを示唆している。

## 6 平均化時間の違いを考慮した年最大風速の確率分布の予測

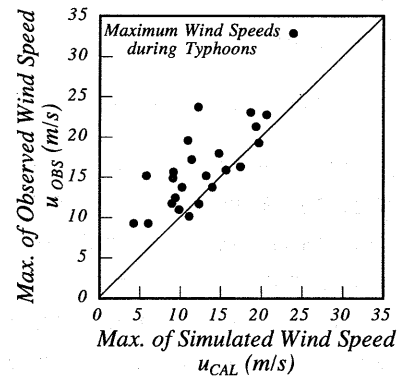
### 6.1 平均化時間の違いを考慮した台風時の最大風速予測式のモンテカルロ・シミュレーションへの導入

台風による年最大風速の確率分布  $F_A(u)$  は次式で表される。

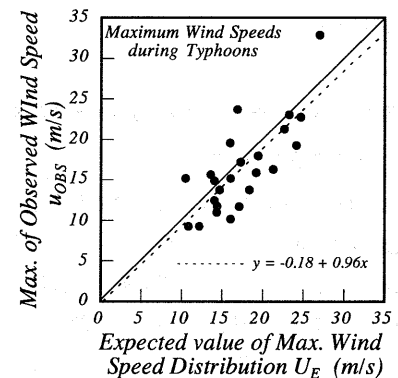
$$F_A(u) = \int_{\Omega} F(u > V|\Omega) f(\Omega) d\Omega \quad (19)$$

ここで、 $\Omega = \{D_P, R_M, C, \theta_T, m, r_{min}, \theta_{min}\}$  は台風気圧場およびその年発生数、発生位置を表す確率変数で、それぞれ中心気圧低下

量、最大旋衡風速半径、移動速さ、移動方向、年発生数、最接近時の台風中心までの距離、方位である。また、 $F(u > V|\Omega)$  は与えられた  $\Omega$  の下で年最大風速が  $u$  以下である条件付き確率、 $f(\Omega)$  は  $\Omega$  の確率密度関数である。



(a) 平均化時間の違いを考慮しない計算値と実測値の最大値の比較



(b) 平均化時間の違いを考慮した場合の最大風速の期待値と実測値の最大値との比較

図9: 台風時の計算最大値と実測最大値の比較

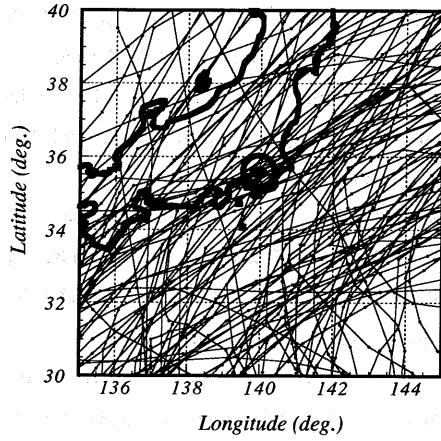


図 10: 計算対象地点(千葉)より 500km 以内を通過した台風の軌跡

表 3: 台風気圧場を表わす確率変数の分布

Variable [Distribution]	Group1 -180° ~ -135° 67.5° ~ 180°	Group2 -135° ~ 67.5°
$D_P$ (hPa) [LN]	$46.6e^{0.280N(0,1)}$	$50.8e^{0.334N(0,1)}$
$R_M$ (km) [LN]	$134.0e^{0.750N(0,1)}$	$109.0e^{0.771N(0,1)}$
$C$ (m/s) [LN]	$15.0e^{0.436N(0,1)}$	$11.1e^{0.596N(0,1)}$
$\theta_T$	perpendicular to $\theta_{min}$	
$m$ [PO] (= $m_1 + m_2$ )	$\bar{m}_1 = 0.907$	$\bar{m}_2 = 1.535$
$\theta_{min}$ (deg.)	$N(142.3^\circ, 23.6^\circ)^2$	$N(-44.2^\circ, 28.6^\circ)^2$
$r_{min}$ (km) [PL]	$260.1uni(0,1)$ $+197.9uni(0,1)^2$	$500.0uni(0,1)$

$N(0,1)$ : standard normal distribution,  $uni(0,1)$ : uniform distribution, [LN]: log normal, [PO]: Poisson, [PL]: polynomial

式 (19) で、 $F(u > V|\Omega)$ ,  $f(\Omega)$  を解析的に求め、積分を実行するのは困難であり、モンテカルロ・シミュレーションにより求めるのが一般的である。前章で提案した台風時の最大風速の予測手法を導入して、式 (19) をモンテカルロ・シミュレーションによって求める方法を以下に示す。

- 1 まず、確率変数  $\Omega$  の値を観測値から決定された確率分布に従う乱数から求め、 $N_T$  年分作成する。
- 2 次に、平均化時間の違いを考慮して、ある台風の 10 分間平均風速の最大値の確率分布を式 (17) から求める。
- 3 第  $i$  年に、 $m_i$  個の台風が発生したとすれば、この年の最大風速  ${}_iF_A(u)$  の確率分布は次式の様になる。

$${}_iF_A(u) = \prod_{k=1}^{m_i} {}_iF_{T_k}(u) \quad (20)$$

ここで、 ${}_iF_{T_k}(u)$  は第  $i$  年の第  $k$  番目の台風の最大風速の確率分布である。

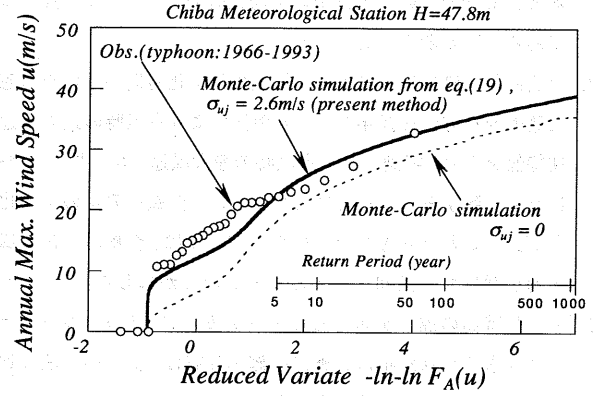


図 11: 本手法による年最大風速の確率分布と従来の手法、実測値との比較

- 4 最後に年最大風速の確率分布  $F_A(u)$  は、次の様に定式化される。

$$F_A(u) \simeq \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} {}_iF_A(u) \quad (21)$$

ここで、 $N_T$  はシミュレーション年数。

## 6.2 千葉測候所における実測値と本手法による計算値との比較

本手法の有効性を示すために、式 (21) を用いて千葉測候所における年最大風速の確率分布を求める。図 10 に対象とした台風の経路図を示す。台風は太平洋側を通過するもの (Group2) とそれ以外のもの (Group1) を対象地点に最接近した時点の方位  $\theta_{min}$  で分類した。それぞれのグループで、確率変数  $\Omega$  の値を表 3 に示される確率分布により求めた。シミュレーション年数は 10000 年とした。

図 11 にモンテカルロ・シミュレーション結果を示す。図中の実測値 (白丸) は台風による年最大風速である。比較のために平均化時間の違いを考慮しない場合 ( $\sigma_{u_j} = 0$ ) の結果を点線で示す。ちなみに、 $\sigma_{u_j} = 0$  の条件の下では、式 (21) による計算結果は、式 (2) による計算値の最大値を Hazen plot したものと完全に一致する。一方、実測とモデルの平均化時間の違いを考慮した本手法は、実測値によく対応し、従来の手法に比べ再現期間 5 年以上で約 5m/s 大きな値を示すことがわかる。

## 7 まとめ

台風シミュレーション手法において、実測値と台風モデルの予測値との平均化時間の違いを考慮して年最大風速を予測する方法を提案した。この手法を千葉測候所に適用し、実測値の比較を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 孟らによって提案された台風時の強風場を求める方法を用いた計算値と、実測値の比較を行った結果、このモデルにより台風時の強風を片寄りなく良い精度で予測することが可能である。
2. 台風モデルを用いた風速の予測値は、なめらかな関数で表わされる気圧場から計算されるので、実測値に比べ小さなスケールの風速変動が含まれない。この差異を平均化時間として評価す

ると、10分間という実測値の平均化時間に比べ、より長い時間であることが明らかとなった。

3. 実測値と台風モデルによる計算値の平均化時間の違いを考慮した確率的な方法を提案し、この手法により台風時の最大風速の期待値を求め、実測された台風時の最大風速(10分間平均風速)に良く一致することを確認した。また、台風モデルの平均化時間が長いことを考慮しない従来の方法では、台風時の最大風速を過小評価する傾向を有することを明らかにした。
4. 平均化時間の違いを考慮したモンテカルロ・シミュレーションにより求められた年最大風速の確率分布は、従来の手法に比べ大きな値を示し、実測値との対応が良いことを示した。

## 謝辞

本研究にあたりご助言いただきました東京工芸大学、田村幸雄先生に謝意を表します。

## 付録：検討に用いた観測記録

### 付1. 風速・風向の記録

検討対象とした千葉測候所における実測値(時別値、日別値)は、気象庁が磁気媒体として公開しているもの<sup>18)</sup>で、時別値として、1966年から1990年までは、3時間毎(3,6,9,12,15,18,21,24各正時)の10分間平均風速、1991年から1993年までは毎正時の10分間平均風速である。台風時の最大風速、年最大風速の検討に用いられる記録は、日最大風速(日別値)を母集団として求めた。なお、これらの風速の平均化時間は10分である。また、本文中、図5で用いられた実測値は、測候所の自記紙に記録された7時間に渡る毎10分の平均風速である。

### 付2. 台風に関する記録

台風は、1951年から1993年の間に、その中心が対象地点から500km以内を通過し、かつその範囲で最低中心気圧が980hPa以下となったもの(総数105)を対象とした<sup>19)</sup>。中心気圧低下量 $D_P$ 、最大旋衡風速半径 $R_M$ は、複数の気象台(台風の中心から500km以内の気象台)で実測される大気圧分布から最小二乗法により同定した。また、台風の中心位置、中心気圧 $p_c$ を気象庁発表の値(6時間毎)からスプライン補間して求め、移動速さ $C$ 、進行方向 $\theta_T$ はこの中心位置から決定した。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 1993.6
- 2) 日本建築センター, 高層建築物の構造評定用風荷重について, ビルディングレター, pp.47-49, 1991.6
- 3) Russell, L. R. : Probability distributions for hurricane effects, Journal of the Waterways, Harbor and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol.97, pp.139-154, 1971.2
- 4) Tryggvason, B. V., Surry, D. and Davenport, A. G. : Predicting wind induced response in hurricane zones, Journal of

the structural division, ASCE, Vol.102, pp.2333-2350, 1976.12

- 5) Georgiou, P. N., Davenport, A. G. and Vickery, B. J. : Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.13, pp.139-152, 1983.
- 6) 牧野稔, 渡壁守正 : ポアソン確率モデルに基づく最大風速の極値分布, 日本建築学会論文報告集 第323, pp.32-41, 1983
- 7) 藤井健, 光田寧 : 台風の確率モデルによる強風のシミュレーション, 日本風工学会誌, No.28, pp.1-12, 1986.6
- 8) Meng, Y., Matsui, M. and Hibi, K. : An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer, Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 56, pp.291-300, 1995
- 9) 孟岩, 松井正宏, 日比一喜 : 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性, その1 非台風時の強風, 日本風工学会誌, No.65, pp.1-15, 1995.10
- 10) 孟岩, 松井正宏, 日比一喜 : 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性, その2 台風時の強風, 日本風工学会誌, No.66, pp.3-14, 1996.1
- 11) Schloemer, R. W. : Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Okeechobee, Florida. Hydrometeorological Report, No.31, 1954
- 12) Gumley, S. J. and Wood, C. J. : A comparison of winds at two sites on the isle of Portland, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.10, pp.47-62, 1982
- 13) 松井正宏, 孟岩, 日比一喜 : 台風シミュレーションを用いた設計風速の設定に関する一考察, 第13回風工学シンポジウム, pp.473-478, 1994.11
- 14) 松井正宏, 孟岩, 日比一喜 : 台風シミュレーションを用いた年最大風速の推定, 第14回風工学シンポジウム, pp.97-102, 1996.12
- 15) Vickery, P. J. and Twisdale, L. A. : Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions, Journal of Structural Engineering, Vol.121, No.11, pp.1700-1709, 1995.11
- 16) Kurihara, Y. and Tuleya, R. E. : Structure of a tropical cyclone developed in a three-dimensional numerical simulation model, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol.31, pp.893-919, 1974
- 17) Ang, A. H-S and Tang, W. H. : Probability concepts in engineering planning and design, Vol.II Decision, risk, and reliability, John Wiley, 1984 (邦訳 伊藤学, 亀田弘行, 黒田勝彦, 藤野陽三 共訳 : 土木・建築のための確率・統計の応用, 丸善)
- 18) 地上気象実測資料SDP, 気象庁, 1961-1993
- 19) 気象要覧, 気象庁, 1951-1993

(1997年5月22日原稿受理, 1997年11月14日採用決定)