

## 台風シミュレーションによる年最大風速の推定

実測に含まれる不規則変動を考慮した最大風速の予測手法

Estimation of Annual Max. Wind Speed by Using Typhoon Simulation

Evaluation of Max. Wind Speed Taking Account of Random Variation in Full Scale Observation

松井 正宏\*      孟 岩†      日比 一喜‡  
Masahiro MATSUI   Yan MENG   Kazuki HIBI

### Abstract

In order to estimate a maximum wind speed under typhoon, random variation was evaluated which exist in full scale observation record. Taking account of the random variation, a probabilistic approach was proposed which can compute an extreme distribution of wind speed with Monte-Carlo method. It was found that ordinary method which could not evaluate random variation was apt to underestimate the maximum wind speed under typhoon. Results of Monte-Carlo simulation by proposed approach agreed with distribution that was decided from observation record.

**Key Words :** typhoon simulation, random variation, extreme distribution, annual maximum wind speed

### 1 はじめに

台風の気象資料の統計を基に台風時の強風の確率分布(年最大風速の確率分布)を間接的に予測する手法では、地上風の予測精度が高いことが重要である。Georgiou[1]や藤井ら[2]は傾度風と地上風の関係に対して経験的な関係を用いたが、孟ら[3][4]は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、地形の影響を明らかにし、地上風の予測精度を向上させた。さらに、松井ら[5]はこの理論的なモデルを用いて対象地点の周囲の大きな地形が風向・風速に与える影響を評価する方法を提案している。これらの手法を用い台風時の風速を推定すると、観測記録の時刻歴は偏りなく良い相関で説明される。しかし、年最大風速の確率分布をモンテカルロシミュレーションによって求めると、観測記録のそれと比較して小さい傾向にあり、その原因は明らかにされていない。

本論文では、実測で得られた記録には、これらのモデルでは説明のできない不規則な変動が存在することを示す。次に、この不規則変動を考慮して最大風速の確率分布を予測する手法を提案する。この提案手法を用いることにより、従来の手法が最大風速に対しては過小評価をしていることを示し、先の年最大風速の過小評価の原因を明らかにすることを試みる。さらに、提案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、その計算結果による年最大風速の確率分布が、実測から直接的手法により求めた分布と風速の広い範囲で良く対応することを確認する。

\*清水建設(株)技術研究所 研究員 (135 東京都江東区越中島 3-4-17 e-mail:suda@sit.shimz.co.jp)

†清水建設(株)技術研究所 研究員、工博

‡清水建設(株)技術研究所 主席研究員、工博

## 2 解析対象地点、台風モデル

Fig.1に解析対象地点を示す。千葉測候所における風速(10分間平均風速)を対象とした。千葉測候所は東京湾に面しており、風向によって粗度が大きく変化すると考えられる。そこで、Fig.1に示す風向に対してTable1に示す粗度を設定した。

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。ただし、風速の検討では、千葉測候所における観測記録が有効な1966年以降のものを用いる。

台風の気圧場を表わす式としてSchloemerの経験式(1)を用い、最小二乗法により中心気圧低下量 $D_P$ 、最大旋衡風速半径 $R_M$ を同定し、台風中心からの距離 $r$ における気圧 $p(r)$ を求めた。台風の中心位置、中心気圧 $p_c$ は気象庁発表の値(6時間毎)をスプライン補間して用いた。

$$p(r) = p_c + D_P \times \exp\left(-\frac{R_M}{r}\right) \quad (1)$$

台風時の強風のモデルは孟ら[4]の鉛直プロファイルを考慮できるモデルを用いた。

$$u_G = \frac{c \sin \beta - fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{c \sin \beta - fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}} \quad (2)$$

$$u_s(z, \theta) = u_G(z/z_G)^{\alpha_u} \quad (3)$$

ただし、 $\alpha_u$ 、 $z_G$ は、地表ロスビー数 $Ro_\lambda$ 、絶対渦度 $f_\lambda$ を用いて次式で与えられる。ただし $f$ はCoriolisパラメータである。 $\beta$ 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(反時計回りを正)。

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

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

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

$$Ro_\lambda = \frac{u_G}{f_\lambda z_0}$$

## 3 台風時の風速のシミュレーションと実測値

千葉測候所に影響する台風についてその気圧場を解析し、台風時の風速を計算した。Fig.2に観測値と計算値の比を風向毎に示す。風向別に地表面粗度を考慮することにより、両者の比は平均的に1に近いものとなる。図中実線は風速比をFourier's seriesでフィッティングしたものおよび標準偏差の範囲である。

さらに細かく粗度を設定すれば、よりこの曲線を1に近づけることは可能であるが、ここでは、この曲線 $R(\theta)$ と風向別粗度長 $z_0(\theta)$ を用いて台風時の風速は次式で予測されるものとした。

$$u_{CAL}(z, \theta) = R(\theta) u_s(z, \theta) \quad (4)$$

式(4)を用いた台風時の風速の計算値と観測値の関係をFig.3に示す。ただし、本研究では強風を対象としていること

Table 1: Variation of Roughness length according to wind direction

Wind Direction	a	b	c
Roughness Length	3m	0.01m	0.1m

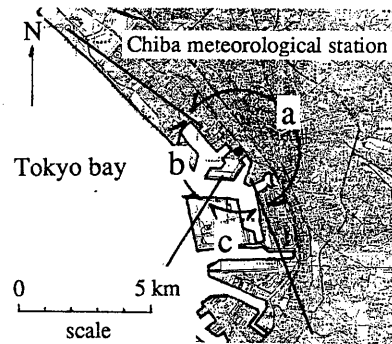


Fig.1 Location of observatory (Chiba meteorological station)

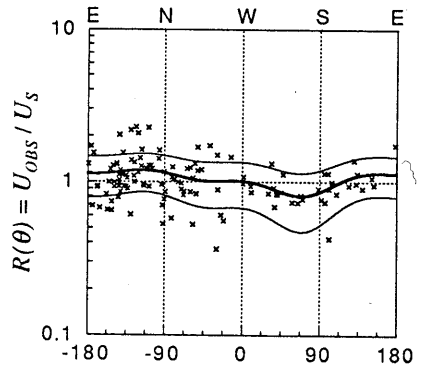


Fig.2 Wind speed ratio ( $U_{OBS}/U_S$ )

を考慮して、計算による傾度風速  $u_G$  が 20m/s 以上のものを選択した。同図で計算値と観測値の差は Fig.4に示すような分布となる。同図中に、標準偏差が同じ値 (2.56m/s) である正規分布を併記したが、台風時の風速の計算値と観測記録の差は正規分布に近い分布となっている。

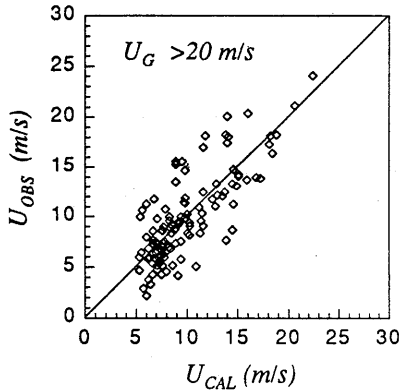


Fig.3 Wind speed  $U_{OBS}$  vs.  $U_{CAL}$

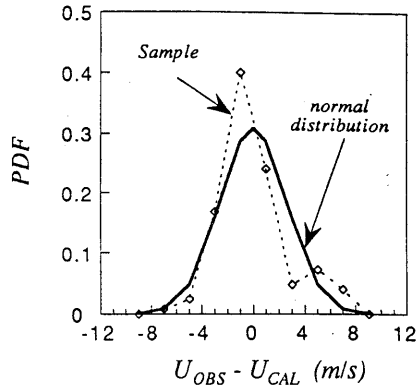


Fig.4 Probability Density Function of  $U_{OBS} - U_{CAL}$

## 4 実測値の不規則変動を考慮した最大風速の予測

### 4.1 台風時の最大風速の予測

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) には不規則な変動が多く含まれている。

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。実際の台風には台風スケールの大きな渦運動以外に、積乱雲のような小さな渦運動も含まれている。このスケールの小さな現象を反映させる方法として、1) 気圧場を表す関数をより複雑 (高次) なものにする、2) 小さなスケールによる大きなスケールからのずれを確率的に取り扱う、の2種類の方法が考えられる。1) の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てしまうこと、現在行われている気象観測記録の密度が十分でないこと、の理由により適当でないと考え、一方、Fig.4に示す様に観測記録の変動は正規分布に近いことから、ここでは2) の確率的な取り扱いをすることにする。

気圧場の揺らぎにより Fig.4に示す様な差異を生ずると考えれば、実際の風速は計算風速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で表される。ある台風の風速を10分間 (600s) 毎に計算したものを  $u_j$  ( $j$ は時刻  $t$  を表す指標、 $t = j\Delta t$ :  $\Delta t = 600s$ ) とすると、この台風時の最大風速は次式で示される確率分布  $F_T(u)$  をとる。ただし、各10分間の変動は独立と仮定した。

$$F_T(u) = \prod_j F_j(u) \quad (5)$$

ここで、 $F_j(u)$  は実現値のとりうる分布で、ここでは Fig.4を参照して正規分布を採用する<sup>1)</sup>。

$$F_j(u) = N(u_j, \sigma_{u_j}^2) \quad (6)$$

ここで  $N(x, \sigma^2)$  は平均  $x$ 、標準偏差  $\sigma$  の正規分布を表す。また、 $F_T(u)$  の確率密度関数  $f_T(u)$  は次式で与えられる。

$$f_T(u) = \frac{d}{du} F_T(u) \quad (7)$$

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観測記録を比較する。Fig.5、Fig.6に台風時の風速時刻歴の式 (4) による計算値と観測値を示した。同図中には式 (7) による予測最大値の確率分布  $f_T(u)$  と、観測記録の最大値 (矢印) を併記した。式 (7) による予測最大値の確率分布  $f_T(u)$  は10分毎に与えられる分布の極大値分布となるため、確率密度の高い部分は、式 (4) による計算値よりも大きい風速となり、その差は3~7m/sである。ただし、Fig.4から  $\sigma_{u_j} = 2.56m/s$  とした。

<sup>1)</sup>ここで正規分布を用いることは  $R(\theta)$  決定の際の最小二乗法とは矛盾しない。最小二乗法では残差の無相関のみを仮定している。

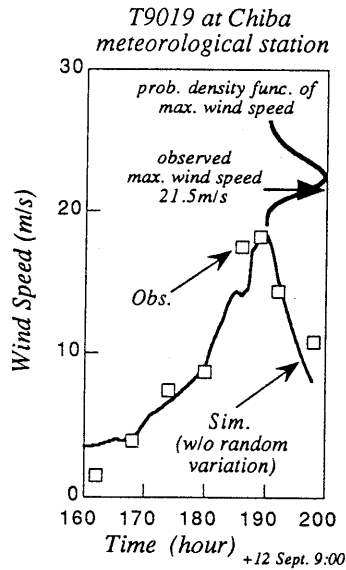
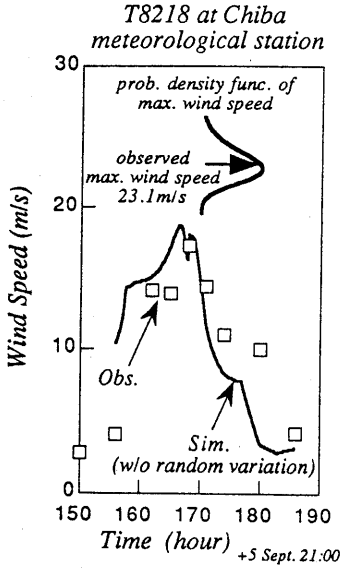


Fig.5 Time history of Typhoon wind speed (T8218) Fig.6 Time history of Typhoon wind speed (T9019)

さらに、多くの台風時の台風に対し、不規則な変動を考慮することによる最大風速の予測値への影響を検討するため、次の2ケースについて観測記録の最大値と比較した (Fig.7、Fig.8)。

1. 不規則変動を考慮しない場合：式 (4) による計算値の最大値
2. 不規則変動を考慮した場合：式 (7) で示される分布の期待値 ( $U_E = \int u f_T(u) du$ )

Fig.7に示す不規則変動を考慮していないケースでは、観測記録は殆どの場合、計算値より大きく、計算値は観測値を過小評価することになる。一方、不規則変動を考慮した Fig.8では、図中、点線で示した回帰式からわかるように、分布の期待値が最大値を偏り無く予測していることが分かる。

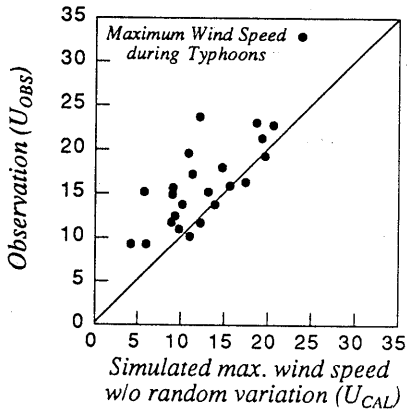


Fig.7 Max. wind speed  $U_{OBS}$  vs.  $U_{CAL}$  ( $U_{CAL}$  : w/o random variation)

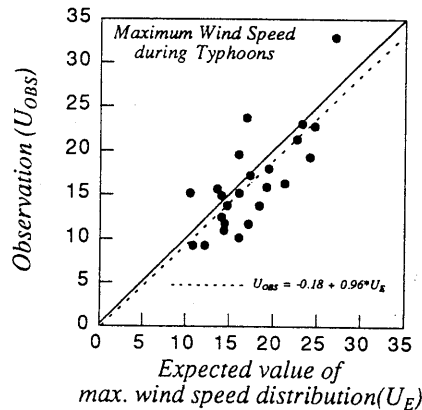


Fig.8 Max. wind speed  $U_{OBS}$  vs.  $U_E$  ( $U_E$  : expected value of extreme distribution)

#### 4.2 年最大風速の確率分布

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。

$$F_A(u) = \int_{\Omega} F(u > V | \Omega) f(\Omega) d\Omega \quad (8)$$

ここで、 $\Omega = \{D_P, R_M, C, D_{IR}, m, r_{min}, \theta_{min}\}$  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。

式(8)をモンテカルロシミュレーションによって求めるには、まず、確率変数 $\Omega$ をその確率分布に従う様に発生させた乱数として $N_T$ 年分作成する。次に、台風時の不規則変動を考慮した最大風速分布を式(5)から求める。

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。

$$F_A(u) \simeq \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \prod_{k=1}^{m_i} {}_i F_{Tk}(u) \right\} \quad (9)$$

ただし、 $N_T$ はシミュレーション年数、 ${}_i F_{Tk}(u)$ は第 $i$ 年の第 $k$ 番目の台風の最大風速の確率分布で式(5)で求められる、 $m_i$ は第 $i$ 年の台風発生数である。

式(9)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。Fig.9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とそれ以外のもの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 $\Omega$ を気圧場の解析結果(Table2)に従い、シミュレーション年数(10000年)分の乱数により発生させた。

Fig.10にモンテカルロシミュレーション結果を示す。比較のために変動を考慮しない場合の式(4)による計算値の最大値をHazen plotしたものを点線で示す。また、図中の観測記録は台風による年最大風速(台風通過時の日最大風速を基にした)である。

不規則変動を考慮した本提案手法は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。また、再現期間5年以下の風速ではその差が大きく、本提案手法と観測記録の対応が良くなっている。

Table 2 Probability Distribution of Pressure Parameters

Variable distribution	Group1	Group2
	-180° ~ -135° 67.5° ~ 180°	-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]	$15.0e^{0.436N(0,1)}$	$11.1e^{0.596N(0,1)}$
$D_{IR}$	perpendicular to $\theta_{min}$	
$m$ [PO] (= $m_1 + m_2$ )	$\bar{m}_1 = 0.907$	$\bar{m}_2 = 1.535$
$\theta_{min}$ (deg.)	$N(142.3^\circ, 23.6^\circ)$	$N(-44.2^\circ, 28.6^\circ)$
$r_{min}$ (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

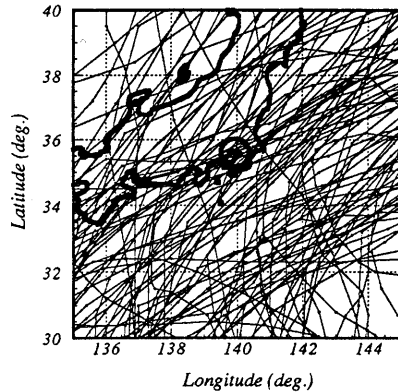


Fig.9 Typhoon tracks around the site

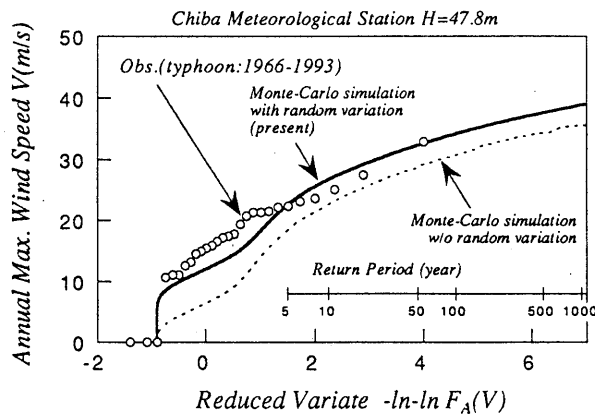


Fig.10 Distribution of annual max. wind speed (Monte-Carlo simulations and observation)

## 5 まとめ

台風シミュレーション手法において、台風に含まれる風速の不規則な変動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、観測記録の比較を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

1. 風速の観測記録は、平均化時間が10分間と明確であり、平均化時間以上のスケールの変動を有するのに対し、なめらかな関数で表わされる気圧場から計算された台風時の風速の予測値には、観測記録に比べ変動が小さくなる。このことを仮定して、台風時の最大風速の分布を予測する方法を定式化した。
2. 台風に含まれる不規則変動を考慮しない従来の方法が台風時の最大風速を過小評価する傾向があることを示し、本研究により提案された手法により台風に含まれる不規則な変動の確率分布から求めた最大風速の期待値は観測された台風の最大風速に良く一致することを示した。
3. 台風に伴う風速の不規則な変動を考慮したモンテカルロシミュレーションを提案した。この手法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、観測記録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。

## References

- [1] Georgiou,P.N., Davenport,AG., and Vickerry,B.J.: Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones, *J.Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.13,1983,pp.139-152.
- [2] 藤井、光田：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,june,1986.
- [3] Y.Meng, M.Matsui, K.Hibi: An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer, *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 56 (1995) 291-300
- [4] 孟、松井、日比：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、その2、*日本風工学会誌*、No.65,66、(1995)
- [5] 松井、孟、日比：設計風速設定のための台風シミュレーション手法、*構造物の安全性および信頼性 (JCOSSAR'95)*、1995
- [6] 気象要覧、気象庁、1951-1993
- [7] 地上気象観測資料SDP、気象庁、1961-1993