

モデル台風による風向特性を考慮した年最大風速確率分布の評価
 Directional Characteristics of Probability Distribution of Extreme Wind Speeds
 by means of Typhoon Simulation

松井 正宏* 石原 孟† 日比 一喜‡
 Masahiro MATSUI Takeshi ISHIHARA Kazuki HIBI

Abstract

Wind directional variation under typhoon condition was studied on the basis of its effect on the annual maximum wind speed. The maximum wind speed will be underestimated for a typhoon model that agrees with the field observation on average. To address this issue a probability method was proposed that enables the maximum wind speed probability distribution to be evaluated. This probability method was extended into wind directional variation.

Before modeling, uncertainty was divided into physical and other condition. The physical variation of wind direction was modeled probabilistically, and its formula is shown. Other uncertainty includes statistical uncertainty (e.g., sampling error), modeling uncertainty and measurement error. These uncertainties were modeled considering two general situations: the maximum indefinite situation, where wind speed was used regardless of its direction, and minimum indefinite (definite), where wind direction was evaluated definitely. Taking these situations into account, a directional wind speed evaluation was formulated.

Effects of physical wind directional variation and wind directional indefinite were indicated as a little increase of wind speeds for long time recurrence wind speeds. More effects were shown in the shorter return period range.

Key Words : typhoon model, wind direction, maximum wind speed, Monte-Carlo simulation

1 はじめに

現在の耐風設計¹⁾において、風向特性は考慮されておらず、全ての風向から同一の設計風速が作用するものとして設計されている。風向を考慮しない年最大風速が全ての風向から作用するという条件は、構造物にとって安全側であるが、合理的な設計とは言えない。そもそも風向特性を考慮して風荷重を設定しようとする考えは自然な発想であり、Davenport²⁾や神田³⁾により、その枠組を構築する試みがなされている。

しかしながら、現在日本において風向特性を考慮した耐風設計が実用化されていない。それは、風向別の強風の確率の予測が困難であることによる。特に、耐風設計で対象とする風速範囲の発現頻度は低く、さらに気象台における風の観測記録も風向毎に最大値が整理されていないので、風向別統計では安定した値が得られない。

この、風向別の強風の確率評価を試みた研究としては、藤野⁴⁾が行った日最大風速に基づく短い再現期間の比較的低風速範囲を対象にした研究や、白石、松本⁵⁾⁶⁾⁷⁾による3時間毎の風速の時刻歴を基にした風向別年最大風速の設定方法などがあげられる。そこでは、風向別年最大風速を求めるにあたって問題となる点は、風向と風速の依存性があることや、年最大風速が風向毎に得られていない点であることの指摘がなされている。また、松井、日比⁸⁾は、特に台風時の風速に限定して台風毎の風向別最大風速を検討し、台風時には隣接する風向間で相関があることを指摘している。このことは、その移動と共に風向が大きく変化する台風時の風向特性を考える上で重要なことであり、台風の性質を考慮した何らかのモデル化手法による解析が期待される。

*清水建設(株)技術研究所 風工学チーム 研究員、工博(135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 e-mail:suda@sit.shimz.co.jp)

†東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻 助教授、工博

‡清水建設(株)技術研究所 流体解析グループ 部長、工博

本報告では、台風モデルを用いて台風時の最大風速の確率分布を求める方法について検討する。まず、台風モデルの風向予測精度を、実現象と比較し、この結果を踏まえ、台風モデルを用いた風向別年最大風速の定式化を試みる。

表 1: 台風モデル

対象	モデル: 円筒座標系 (r, θ, z)
気圧場 $P(r)$	Schloemer の式 ⁹⁾ $P(r) = P_C + D_P \exp -(R_M/r)$ (1)
傾度風 u_G	Blaton の公式に基づく曲率補正 ¹⁰⁾ $u_G = \frac{C \sin \theta_r - fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{C \sin \theta_r - fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}}$ (2)
大気境界層 $u(\theta), \theta(z)$	孟の台風時の大気境界層モデル ¹¹⁾ $u(z) = u_G(z/z_G)^{\alpha_u}$ (3) $\theta(z) = \theta_G + \theta_S(1.0 - 0.4 \frac{z}{z_G})^{1.1}$ (4)
地上風	Gumley & Wood のキャリブレーション手法 ¹²⁾

表中、 P_C :中心気圧、 D_P :中心気圧低下量、 R_M :最大旋衡風速半径、 C, θ_r :移動速さ、方向を表す。

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

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

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

ここで、 z_0 は粗度長、 $Ro_\lambda (= u_G/f_\lambda z_0)$ は地表ロスビー数。

2 台風モデル

表 1にここで用いたモデルを示す。モンテカルロシミュレーションで用いられるモデルには精度と計算の容易さが要求される。このため過去の研究者¹⁰⁾¹³⁾¹⁴⁾は、与えられた圧力場から風の場を求める手法を採用してきた。ここでも、同様な手法を用いる。ただし、台風時の大気境界層の計算では、エクマン境界層における絶対渦度 f_λ を考慮できる孟のモデル¹¹⁾を用いた。また、実測とのキャリブレーション(較正)により予測精度向上を計っている。

3 最大風速の評価方法とモンテカルロ シミュレーション

3.1 台風時の最大風速を確率的に推定するモデル

松井らは、台風時の最大風速をひとつの値ではなく、実測に含まれる平均化時間に対応した変動を考慮して、最大値がとりうる値の確率分布を求める方法を示した¹⁵⁾。

ある台風の風速を 10 分間毎に上記の台風モデル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。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、その変動の範囲は各時間で独立な確率分布 $F_j(u)$ で表されるものとする。このとき台風時の 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。

$$F_T(u) = P(u_1 \leq u, u_2 \leq u, \dots, u_n \leq u) = \prod_j F_j(u) \quad (8)$$

マクロな台風モデルの予測値をそのまま用いる従来の手法では、最大風速を過小評価してしまう。平均化時間に対応した変動を考慮することによりこの問題は解決された¹⁵⁾。

3.2 モンテカルロシミュレーションの評価方法

年最大風速の確率分布の計算には、モンテカルロシミュレーションがしばしば用いられるが、その後処理として、順序統計量に基づく直感的なデータ処理が行われてきた。しかしこの方法では、前述の最大風速を確率的に予測する方法を適用することが困難であるため、次に示す基礎式に基づき、計算方法を表した。

モンテカルロシミュレーションで評価される式は基本的には次のものである。

$$F_A(u) = \int_{\Omega} F(u > V|\Omega) f(\Omega) d\Omega \quad (9)$$

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 Ω の下で年最大風速が u 以下である条件付き確率、 $f(\Omega)$ は Ω の確率密度関数である。

この基礎式をシミュレーションで得られる最大風速と関連付け、離散化すると、次のようになる¹⁵⁾。

$$F_A(u) \simeq \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \prod_{l=1}^{m_i} F_{T_l}(u) \right\} \quad (10)$$

ここで、 N_T はシミュレーション年数、 ${}_{i,l}F_{T_l}(u)$ は第*i*年の発生回数 m_i のうち第*l*番目の台風の最大風速の確率分布で、式(8)で与えられる。

3.3 風向変動を考慮した確率分布の定式化

上記の定式化では、風速の変動に対して確率的な取り扱いを行なったが、ここでは、さらに風向変動に対しても確率的な取り扱いを行なうこととする。

風向別の最大風速、年最大風速の確率分布は以下の様に定式化される。一つの台風時の風向区画 k の最大風速の確率分布が、 j を時刻に関する添え字として次式で表される¹⁶⁾。

$$F_{T_k}(u) = \prod_j F_j(u) W_k(\theta_j) \quad (11)$$

ここで、 $F_j(u)$ は、時刻 j に予測される計算風速 u_j を平均値とする確率分布で、ここでは正規分布とする。 $\sigma_{u_{10}}$ はその標準偏差である。 $W_k(\theta_j)$ は、計算風向 θ_j から定まる風向の確率密度関数 D が風向区画 k の範囲に含まれる面積である。 $D(\theta - \theta_j)$ は計算風向を中心とする確率密度関数で、平均化時間 10分の実測風向の変動範囲を表す(図1)。また、 D が確率密度関数であることから、 $0 \leq W_k(\theta_j) \leq 1$ である。 $W_k = 1$ の場合には、式(11)が、全風向の最大値を与える式(8)と一致することが分かる。

さらに風向区画 k における年最大風速の確率分布が、次式で与えられる。

$$F_{A_k}(u) \simeq \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \prod_{l=1}^{m_i} {}_{i,l}F_{T_k}(u) \right\} \quad (12)$$

ただし、 N_T はシミュレーション年数、 ${}_{i,l}F_{T_k}(u)$ は第*i*年の第*l*番目の台風の最大風速の確率分布で式(11)で求められる。

4 計算対象地点

4.1 サイト、気象データ

千葉測候所を対象とした。図2に千葉測候所の概要を、表2に風向別に設定した粗度長を示す。風向別粗度を考慮することにより、風速はバイアス無く予測できたが、風向に関しては系統的なずれがあり、これを Gumley & Wood¹²⁾の較正手法で修正した。この手法では、較正の際にターゲットとリファレンスを設定するが、リファレンスとして、傾度風の風向を、ターゲットとして、対象とする気象官署の実測値を設定した。

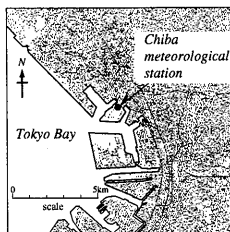


図2: 千葉気象台位置とその周辺状況

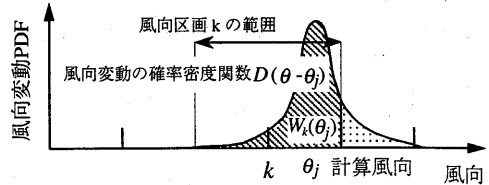


図1: 風向の確率密度関数 $D(\theta)$ と $W_k(\theta)$ の関係

表2: 千葉気象台周辺の風向別粗度長

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

粗度区分は荷重指針¹⁾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、荷重指針に示されるべき指数から式(5)を用いて求めた。

4.2 較正に用いた記録との比較

予めいくつかの台風についてモデルによる計算値と実測との比較を行ない、風向偏差が求められ、シミュレーション時にこの偏差が補正される。この較正では、台風気圧場の影響が強い条件(傾度風速 20m/s 以上)の記録を選択した。

図3に、較正に用いられた風向記録と補正後の計算値との比較を示した。補正後の計算値は、1風向区画程度の差である(同図(a))。ちなみに風向予測値と記録の残差の標準偏差は約25°である。また、同図(b)の風向別発生頻度に見られるように、較正に用いられたデータはSを中心とする風向と、Nを中心とする風向が頻度が高い。風向EまたはWを中心とする風向では極めて少なくなっている。

図4に実測された10分間平均風速の時刻歴を台風モデルによる予測値と合わせて示す。台風モデルにより求められた風向風速は、実測に見られるランダムな変動を再現しないものの、平均的な傾向をよく再現している。しかし、最大風速には、このランダムな変動の影響が大きい。風速の変動は2~3m/s、風向変動は10度程度である。風向変動については、風向の表示精度が低いことも関係していると考えられる。風向表示精度は、通常22.5度、原簿にあてれば10度程度である。

5 計算ケース

表3に示す4ケースの計算をおこない風向変動の影響を検討する。風向特性は、ケース1では考慮されていないが、ケース2、3にて考慮されている。風向の変動はケース2では考慮されていないが、ケース3にて考慮されている。ケース4については後述する。

比較的強風時の観測結果との比較により、実測に含まれる風速の変動は、標準偏差が2.6m/sの正規分布とする。また、図4から、実測における平均化時間10分の風向変動は瞬間的な風向の変動にくらべかなり小さく、実測の表示精度(10度)のオーダーであると考えられ、ここでは標準偏差10度の正規分布とする。

6 計算結果と考察

6.1 風向を考慮する場合としない場合の比較

風向を考慮する場合としない場合を再現期間100年の風速で比較する(図5中のケース1とケース2の値)。

ここで対象とした千葉測候所では、風向別再現期間100年の風速は、風向SE-SWに渡る風向で高い風速となる。その値は風向変動なしのケース2では、最大で風向を考慮しない場合の0.89倍に達する。一方、Nを中心とする風向では風速は低くなり、NNWで最も低く、風向を考慮しない場合の0.47倍である。風向を考慮すると、風速は風向毎に異なるものとなるが、風向を考慮しない値を超えることはない。

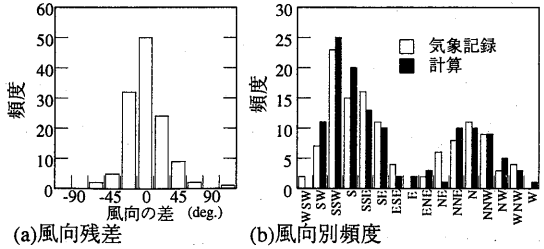


図3: 較正用気象記録と計算値の風向分布および残差

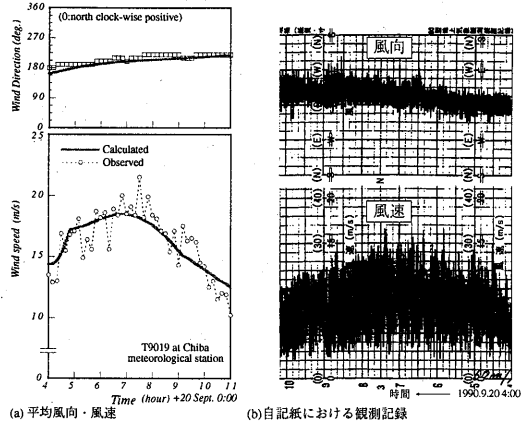


図4: 台風9019号の記録(千葉測候所:10分平均/自記紙)

表3: 計算ケース

ケース	風向特性	風向変動	風向不確定性
1	—	—	—
2	○	—	—
3	○	○	—
4	○	○	○

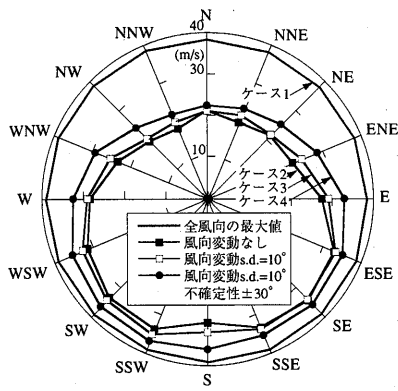


図 5: 100 年再現期間風速の風向特性

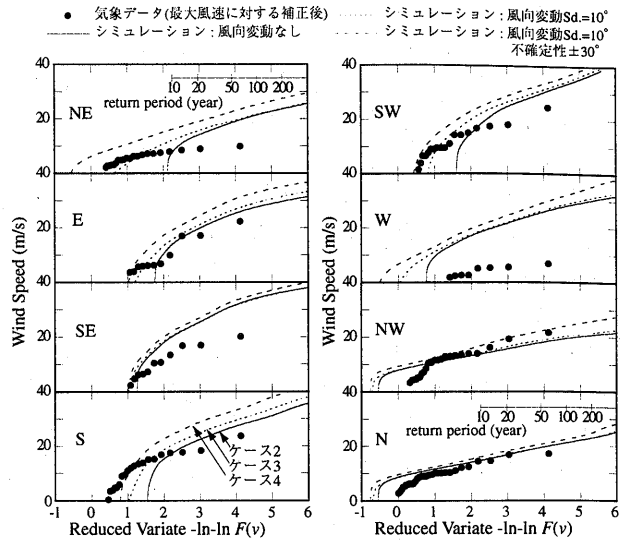


図 6: 年最大風速確率分布の風向特性

6.2 風向変動を考慮する場合としない場合

風向変動を考慮した場合の式 (11) の平滑効果により、同じ再現期間の風速は、風向変動を考慮しない場合に比べて高くなる風向と低くなる風向が期待されるが、図 5 を見ると、再現期間 100 年の風速では、僅かではあるが一般にどの風向でも大きくなる効果が現れている。

図 6 に風向毎の年最大風速の確率分布を示した。計算を行なった 16 方位のうち 8 方位についてここで示す。図中のプロットは、観測値であるが、データが欠落していたり対象風向の生起頻度が低い等の理由から不完全なものであることに注意する必要がある。あくまで、傾向を比較するためだけに併記した。風向 W は気象データでは非常に発生頻度が低くかつ風速も小さい。これに対してシミュレーションによるものはかなり大きな風速を示している。しかし、これ以外の風向では、風速の大きさ、勾配等、実測値とシミュレーションによる計算値は比較的良く対応している。また、風向変動を考慮した影響は低風速の範囲で大きい。風向 W で実測との対応がとれない原因は不明であるが、以下のことが考えられる。風向 W は風向 E と並んで較正に用いられたデータ数が非常に少ない風向であること、また、風向 W の風上には中部山岳地が控えており、風上に標高の高い地形が無い風向 E とは対照的である。

6.3 風向予測に関する精度の考慮方法

前述した式 (11) には、風向変動について予測誤差が考慮されていないので、これらの考慮方法を考える。ただし、これは、実務的な対応方法に関する一案であり、現象の物理的な考察とは異なることに注意を要する。

実際の設計で取られる方法を勘案すると、次の 2 種類の状態が想定される。風向に関する情報が全く不完全である場合、観測されたすべての風向のデータから年最大風速の標本母集団を作成し、対象とする構造物にすべての風向からその風が作用すると考える。一方、シミュレーションなどで得られた風向、風速の情報がモデルか誤差などを含まない完全なものであるとするならば、計算結果は直ちに採用することができる。

この 2 つの極端な状態とその実務的な対応方法は式 (11) における指数 $W_k(\theta_j)$ を次式で与えることにより定式化することができる。

$$W_k(\theta_j) = \int_{-\pi}^{\pi} D(\theta - \theta_j) E_k(\theta) d\theta \quad (13)$$

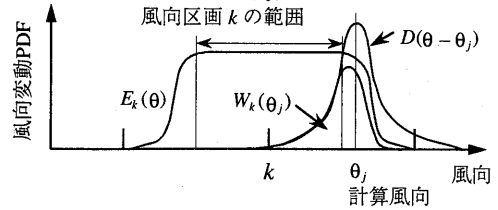
$E_k(\theta)$ は、風向区画 k を中心とする範囲で、不確定性を考慮するための窓関数でその最大値は 1 をこえないものとする (図 7)。この窓関数の範囲が広がることにより、風向の影響がより広い範囲に及ぶようになる。 $E_k(\theta)$ が最も広がった

状態 ($E_k(\theta) = 1$ for all θ)、則ち風向が不確定な状態では、 $W_k(\theta_j) = 1$ となり、風向を考慮しない場合に一致することとなる。また、 D が確率密度関数であることと、 E の最大値が1であることから、 $0 \leq W_k(\theta_j) \leq 1$ である。

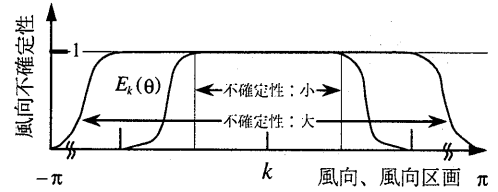
この風向不確定性を考慮した計算結果は、計算ケース4として前述の計算結果に並記した(図5、図6)。風向の不確定性 $E_k(\theta)$ の範囲の決定にあたっては、モデル化誤差、統計上の標準化誤差など種々の条件を考える必要があるが、そのオーダーに関しては、図3が参考になると考えられる。ここでは、評価誤差を1~2風向区画程度と考え、窓関数 E が1となる範囲を ± 30 度とした。

風向別再現期間100年の風速(図5)では、風向不確定性を考慮することにより、風速は全体に平滑化され、かつ、大きく評価されている。ただし、これらの値は、風向不確定性をいかに大きくとっても、風向を考慮しない場合の値を越えることはない。

風向別年最大風速確率分布(図6)は、すべての再現期間の風速で、風向不確定性を考慮することにより風速が増加していることが分かる。ただし、風向SE、SSEなど、他の風向より大きな風速を示す風向では、その影響は小さい。



(a) 風向変動の確率密度関数



(b) 風向 k に関する不確定性 $E_k(\theta)$

図7: 風向変動のPDF, $D(\theta)$ 、風向不確定性窓関数 $E_k(\theta)$

7 まとめ

較正対象とした気象データに対する台風モデルの風向予測精度を確認した。また、実観測には平均化時間に応じた風向変動が含まれることを示した。さらにこのことを考慮して、設計風速を設定する際に用いられる、台風モデルによるシミュレーション手法で、風向特性を評価する方法を定式化した。

定式化された手法と気象観測記録との対応を見るために、気象台で観測された気象記録から台風時の風向別年最大風速の確率分布を求め、これとモンテカルロシミュレーションの結果がおおむね対応することを示した。

風向に関する非確定要因を、実現象の持つ物理的な変動特性とモデル不確定性に明確に分離した。さらに両者に対する評価方法を区別して、定式化した。風向変動や不確定性を考慮することにより同一の超過確率の風向毎の風速は大きく評価されるが、風向を考慮しない場合をこえることはなく、風向特性が反映された合理的な設計風速の設定が可能となると考えられる。

[謝辞] 種々貴重な御助言を戴きました京都大学大学院 松本勝先生、東京工芸大学 田村幸雄先生に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会、建築物荷重指針・同解説、1993
- 2) Davenport, A.G.: The Relationship of Reliability to Wind Load, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn., 13, pp.3-27, 1983
- 3) 神田: 風向別発生頻度を考慮した外装材用設計風速の試案、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.121-122, 1995
- 4) 藤野、伊藤、田村: 風向を考慮した風速統計に関する研究、第9回風工学シンポジウム論文集、pp.31-38, 1982
- 5) 白石、松本: 日本各地の自然風および風向生起分布特性、日本風学会誌、第11号、pp.49-74, 1982
- 6) 松本、白石、白土、築山: 風向別強風の予測モデルと長大橋梁の耐風安全性評価への応用、土木学会論文集第404号、pp.305-314, 1989
- 7) 松本、白石、白土、村上、八木: 全国の風向別強風の確率統計評価に関する研究、第11回風工学シンポジウム論文集、pp.311-316, 1990
- 8) 松井、日比: 気象データに基づく台風時の風向特性に関する統計的考察、第15回風工学シンポジウム論文集、pp.67-72, 1998
- 9) Schloemer, R.W.: Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Okeechobee, Florida. Hydrometeorological Report, No.31, 1954
- 10) 藤井、光田: 台風風の確率モデルによる強風のシミュレーション、日本風学会誌、No.28、pp.1-12, 1986
- 11) 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2 台風時の強風、日本風学会誌、No.66, 1996
- 12) Gumley, S.J. & Wood, C.J.: A Comparison of Winds at Two Sites on The Isle of Portland, J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn., 10, pp.47-62, 1982
- 13) 牧野、渡壁: ボ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号、pp.32-41, 1983
- 14) 後藤、渡辺、中村、田村: 台風シミュレーションを用いた強風の風向依存性に関する研究、日本風学会誌、55号、pp.3-4, 1993
- 15) 松井、孟、日比: 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、日本建築学会構造系論文報告集、1998
- 16) 松井、日比: 台風時の風向特性を考慮した設計風速、日本風学会誌、第79号、pp.5-6, 1999