論文

送電用鉄塔の耐風設計のための風向別基本風速に関する検討

A STUDY ON DIRECTIONAL BASIC WIND SPEED FOR THE WIND RESISTANT DESIGN OF TRANSMISSION TOWERS

山崎智之^{*1}, 石川智巳^{*1}, 大熊武司^{*2}, 田村幸雄^{*3}, 北嶋知樹^{*4}, 中村秀治^{*5}, 加藤央之^{*1}

Motoyuki YAMAZAKI, Tomomi ISHIKAWA, Takeshi OHKUMA, Yukio TAMURA,

Tomoki KITASHIMA, Hideharu NAKAMURA and Hisashi KATO

SUMMARY

Since the wind load is critical for the design of transmission lines, it is important to assess the design wind speed reasonably at construction sites. Wind loads acting on the transmission tower usually vary greatly by direction because of the structural characteristics. However, in the current design method of transmission towers, non-directional basic wind speed is applied in Japan, and therefore in many cases this may result in overestimation. In this paper, a method to estimate directional basic wind speed for the transmission tower design is proposed. The return period of the directional wind speed is estimated keeping the same non-exceeding probability of occurring stresses as the current design method. Then directional basic wind speeds at meteorological stations are determined by comparing with the typhoon simulation results.

Keywords: transmission tower, directional basic wind speed, return period, typhoon simulation

1 はじめに

送電線路は電力輸送に関わる重要な社会基盤構造物であり、十分な信頼性・安全性とともに、建設コストの観点から高い合理性が要求される。送電線路は架渉線とこれを支持する送電用鉄塔から構成される構造物であり、構造上、風荷重が支配的荷重になることが多い。また、送電線ルートや建設用地確保の制約上、山岳部や沿岸部など風荷重条件の厳しい地点に建設されることが多いのが現状であり、建設地点の諸条件に応じて合理的に設計風速を見積もることが重要となる。送電用鉄塔は架渉線を支持する構造物であるため、これ

に作用する風荷重は強風時の風向によって顕著に変化すると同時に、年最大風速は対象地点の地理的位置、周辺地形や粗度の状況、台風の通過経路および季節による強風の卓越風向の違い等から、風向によって大きく異なるものと考えられる。しかしながら、現在の耐風設計手法^{1),2)}では、風向を考慮して荷重算定を行うこととしているものの、設計風速については風向にかかわらず一律の値としている。風向を考慮しない全風向の年最大風速から求められた風速によって設計する手法は、耐力面では安全側評価を与えるものの、建設コストの面では必ずしも合理的とは言えない。

^{*1} (財)電力中央研究所
Central Research Institute of Electric Power Industry

^{*2} 神奈川大学
Kanagawa University

^{*3} 東京工芸大学
Tokyo Institute of Polytechnics

^{*4} 東京電力株式会社
Tokyo Electric Power Company

^{*5} 広島大学
Hiroshima University

そこで、本研究の位置付けを明確にするため、設計風速と風向別設計に関する既往の規・基準、研究例を以下に整理する。

耐風設計で用いられる設計風速の設定には、文献2),3)に見られるように、官署で観測された年最大風速を極値分布にあてはめることによって、所定の再現期間に対する風速を求める方法が広く適用されている。しかしながら、観測された風速は、強風の発生要因による分類がなされていないこと、観測期間が有限であることや観測データにサンプリングエラーを有することなどの課題を有している。

風向別設計に関して、ASCE7-02⁴⁾では風向係数という概念を導入し、全風向風速から求めた設計風速に対し風向係数を乗じることで、風向別風速による低減効果を考慮している。また、Australian Standard⁵⁾では、観測データの豊富な主要都市周辺を対象に風向別基本風速を与えるものとし、それ以外の地域では全風向風速に対する低減係数の適用領域を定めることで風向別風速の効果を反映している。一方、日本においては風向別風速を取り入れた設計手法は、土木・建築分野の規・基準においても未だ例が無いものの、風向別風速に関する研究は積極的に行われている。神田ら⁶⁾は外装材を対象として風向特性を考慮した設計風速の最適化手法を提案し、建設コストの面からその合理性を示している。また藤野ら⁷⁾は風向別再現期間風速算定には風向と風速に依存性があることや、短い観測期間のデータから求めた風向別再現期間風速の誤差の定量化を試み、風向別風速の有利性を示している。さらに白石・松本ら⁸⁾は比較的短期間における3時間毎の風観測記録を基に、極値分布によって求めた再現期間風速と、Weibull分布からの再現期間風速の比を風向別に台風係数として求め、風向別の強風特性の評価を行っている。また日本建築学会では、建築物荷重指針の改定にあたり風向係数の導入を視野に入れた風向別設計の体系化を検討している⁹⁾。

このような状況を踏まえ、本論文では送電用鉄塔の合理的かつ実用的な荷重評価手法の確立を図ることを目的として、風向別基本風速を求めるための方法論の提案と風向別基本風速の定量化を試みるものとした。

風向別基本風速を策定する場合の問題点は、第一に風向別基本風速の再現期間を設定する方法、第二に風向別に再現期間風速を精度よく求めるための方法が挙げられる。本論文ではこの二点について検討した結果を中心に述べる。

第一点については、従来、再現期間は風向を考慮しない年最大風速に対して定めていたが、送電用鉄塔の荷重効果の特性を考慮することにより、風向別風速の再現期間について検討した。この際、風向別に風荷重効果を評価して得られる全体の安全性が、従来と同程度の安全性レベルを維持することを基本とした。

第二点に関しては、まず気温によって張力荷重の変化が大きい送電線路の特性から、観測値を季節（高温季・低温季）で区別し、さらに高温季にあつては観測値の成因（台風および非台風）により区別して再現期間風速を算定した。また台風の観測値については、風向別とすることによるデータ不足から、信頼性の高い統計値を算出するのは困難と判断し、観測値と台風シミュレーションのキャリブレーションによって風向別基本風速を定量化するための方法を検討し、新たな方法論の提案を行った。さらに、その方法を実際の官署に適用した場合の風向別基本風速の算定結果について示した。

2 風向別基本風速の再現期間に関する検討

2.1 風荷重効果を考慮した再現期間の考え方

送電用鉄塔のように風向によって荷重効果が大きく変化する構造物の場合、風向別に設計風速を設定することにより、設計の合理化が期待できる。

まず、代表的な架線状態における送電用鉄塔の風向特性について示すこととする。ここでは、全風向一律の平均風速としたときの、各風向における最下節の支柱材の4脚に作用する軸力を算定した。送電用鉄塔の支柱材は通常、軸圧縮力が支配的であるため、軸圧縮力の最大値で評価した。算定にあたっての計算条件はTable 1の通りであり、粗度区分に応じた上空風高さ、ベキ指数、乱れの強さ、および乱れのスケールは文献3)に準拠した。検討に用いた鉄塔モデルをFig.1に示す。

最下節の支柱材の軸力算定は、風の乱れによって生じる規模効果、共振効果を考慮した等価静的風荷重算定法¹⁰⁾によるものとし、架線状態は、Fig.2に示すように、径間長、架線の水平角度の組み合わせによる6ケースとした。なお、風向は北を0度とし時計回りに測った角度で表す。

Fig.3は各ケースの架線状態において算定した最下節の軸圧縮力の最大値に対する軸力の比率を示したものである。架線に水平角度を有しないケース[1]、[2]は、0度および180度付近の風向の時に軸力の最大値

を示す．一方，架線に水平角度を有するケース[3]～[6]は，0 度風向では風圧荷重と架渉線の張力荷重の方向が逆方向となるため軸力が低下し，180 度付近では最大値を，45 度，315 度付近で極大値を示すような特徴的な挙動を示す．このように送電用鉄塔は，同じ風速であっても風荷重効果が風向によって大きく変化することから，荷重効果の小さい風向では大きい風向に比べて設計強度に対する年超過確率への寄与率が小さくなる．したがって，このような影響を考慮して再現期間を定めることにより，鉄塔ごとのばらつきの少ない，より合理的な耐風設計が可能になるものと考えられる．

送電用鉄塔の耐風設計にあたって参照される JEC-127-1979²⁾には，全風向年最大瞬間風速の 50 年再現期間に対する地域別速度圧が示されている．そこで，再現期間 50 年から想定される安全性のレベルが，送電用鉄塔の設計軸力に対する年超過確率 0.02 に相当するものとし，これと同等の安全性を確保するための風向別風速の再現期間について検討した．なお，再現期間 50 年の意味する安全性のレベルについては，設備重要度，建設コスト，維持管理等の観点から今後十分な議論が必要である．

また，風向別風速の分割数を設定する必要があるが，風向は 8 風向として検討を行うものとした．これは本論文の手法を現在想定している実務設計へ適用する場合の設計者に対する便を考慮して判断したものである．

Fig.1 検討用鉄塔モデル

General view of a transmission tower model

Table 1 算定条件
Calculation conditions

対象鉄塔	500kV，2回線，耐張型，鋼管鉄塔
鉄塔高さ	77.5m
架渉線種類	架空地線 OPGW290mm ² ，単導体 電力線 ACSR810mm ² ，4導体
架渉線張力 (風速40m/s作用時)	架空地線 33.3 kN/条 電力線 49.0 kN/条
10m高さ風速	40m/s (粗度区分，全風向一律)
ディケイファクタ	水平横方向:10，鉛直横方向:10

Fig.2 架線状態ケース
Arrangement cases of towers and cables

Fig.3 風向による最下節主柱材の軸力の比率
Ratio of axial forces of the lowest posts by wind direction

2.2 風向別風速の再現期間の算出手順

送電用鉄塔の軸力の再現期間 50 年に相当する風向

別風速の再現期間を設定するための検討手順は以下に示す通りであり，検討フローを Fig.4 に示す．

風向別風速の再現期間を R 年（例えば 50 年）として仮設定する．

観測結果等に基づいて予め設定した風向別風速の分布形に依り，再現期間 R 年に対する 8 風向別風速値 V_i を設定する．ただし i は風向を示し，1 から 8 をとる．ここで設定した風速値 V_i が各 8 風向を代表する風速値となる．

8 個に分割した風向のうち，各風向を中心とした $\pi/4$ の角度内において最大の荷重効果を有する角度 θ_i を見出す．具体的には，風向毎に設定した V_i によって，角度をパラメータに最下節の支柱材軸力を算定し，4 脚の軸圧縮力の最大値を $N(V_i, \theta_i)$ として算定する．

で求めた 8 個の軸力 $N(V_i, \theta_i)$ の最大値を求め，この値を再現期間 R 年に対する風向別風速に対する設計軸力 $N_{\max}$ として設定する．

Gumbel 分布に基づき，長期間（ T 年間）の年最大風速値を作成する．再現期間 R （非超過確率は $1-1/R$ ）とこれに対する風速値 V_i ，Gumbel 分布の直線の傾き $1/a$ から風向毎に T 年分の年最大風速値 V_{ij} （ $j=1 \sim T$ ）を算定する．

$$F_j = 1 - \frac{j}{T+1} \quad (1)$$

$$y_j = -\ln(-\ln F_j) \quad (2)$$

$$V_{ij} = b + \frac{y_j}{a} \quad (3)$$

ただし，係数 a は初期設定値とし，係数 b は非超過確率 $1-1/R$ とそのときの風速値 V_i より定まる．

で設定した風向毎の T 年分の年最大風速値 V_{ij} に対応する角度 θ_{ij} を設定する．ここでは，角度 θ_{ij} は，各風向 $\pi/4$ の角度内において風向による風速の発現確率に偏りが無く一様分布に従うものと仮定し，式(4)により求める．

$$\theta_{ij} = \frac{\pi}{4} \left(i + r_j - \frac{1}{2} \right) \quad (4)$$

r_j : 一様乱数 ($0 < r_j < 1$)

j : $1 \sim T$

で設定した風速値 V_{ij} と，で設定した角度 θ_{ij} による風荷重から，最下節の支柱材の軸力 $N(V_{ij}, \theta_{ij})$ を算定し，風向毎に設計軸力 $N_{\max}$ を超

過する個数 n_i を積算する．

設計軸力に対する年超過確率 P を式(5)により算定する．

$$P = \sum_{i=1}^8 \frac{n_i}{T} \quad (5)$$

設計軸力の年超過確率 P と目標としている年超過確率とを比較する．最下節の支柱材軸力の年超過確率の最低値が 0.02 を下回る場合，の風向別風速の再現期間 R を設定し直し，最下節の支柱材軸力の年超過確率の最低値が 0.02 となる再現期間 R を見出す．

Fig.4 風向別再現期間検討フロー
Flow chart for the estimation of return period of directional basic wind speed

2.3 風向別風速の再現期間の検討条件と検討結果

ここでは，2.1 に示す鉄塔を対象とし，Fig.5 に示す鉄塔位置と風向との関係を仮定して風向別風速の再現期間を検討することとした．架線状態は Fig.2 に示す径間長と水平角度を組み合わせた代表的な 6 架線ケースとした．また，地上高さ 10m 位置の平均風速の分布は，Fig.6 に示すとおりであり，全風向で風速が一律となる分布ケース(1)，相対する 2 風向の風速が突出する分布ケース(2)～(5)，特定の風向の風速が大きい分

布ケース(6)~(13), 特定の風向の風速が小さいケース分布(14)~(21)の計 21 ケースとした。架線状態と風速分布を組み合わせた検討ケースの一覧を Table 2 に示す。各風向あたりの風速データは Gumbel 分布に従う 10000 個のデータとした。また Gumbel 分布の直線の傾き $1/a$ は, 対象地点の地理的位置や風向によってばらつきを有し, 著者らによる官署の調査結果によれば平均値は 3.0, 標準偏差は 1.4 程度となっているが, ここでは代表値として 3.0 と 4.0 の 2 ケースとした。

Fig.5 鉄塔と風向の配置
Location of tower and wind directions

Fig.6 風向別風速の分布ケース一覧
Cases of directional wind speed distribution

Table 2 検討ケース一覧
Cases of study for return period

case	風向 風速	架渉線 状態	case	風向 風速	架渉線 状態	case	風向 風速	架渉線 状態
1	(1)	[1]	43	(1)	[3]	85	(1)	[5]
2	(2)		44	(2)		86	(2)	
3	(3)		45	(3)		87	(3)	
4	(4)		46	(4)		88	(4)	
5	(5)		47	(5)		89	(5)	
6	(6)		48	(6)		90	(6)	
7	(7)		49	(7)		91	(7)	
8	(8)		50	(8)		92	(8)	
9	(9)		51	(9)		93	(9)	
10	(10)		52	(10)		94	(10)	
11	(11)		53	(11)		95	(11)	
12	(12)		54	(12)		96	(12)	
13	(13)		55	(13)		97	(13)	
14	(14)		56	(14)		98	(14)	
15	(15)		57	(15)		99	(15)	
16	(16)		58	(16)		100	(16)	
17	(17)		59	(17)		101	(17)	
18	(18)		60	(18)		102	(18)	
19	(19)		61	(19)		103	(19)	
20	(20)		62	(20)		104	(20)	
21	(21)		63	(21)		105	(21)	
22	(1)	[2]	64	(1)	[4]	106	(1)	[6]
23	(2)		65	(2)		107	(2)	
24	(3)		66	(3)		108	(3)	
25	(4)		67	(4)		109	(4)	
26	(5)		68	(5)		110	(5)	
27	(6)		69	(6)		111	(6)	
28	(7)		70	(7)		112	(7)	
29	(8)		71	(8)		113	(8)	
30	(9)		72	(9)		114	(9)	
31	(10)		73	(10)		115	(10)	
32	(11)		74	(11)		116	(11)	
33	(12)		75	(12)		117	(12)	
34	(13)		76	(13)		118	(13)	
35	(14)		77	(14)		119	(14)	
36	(15)		78	(15)		120	(15)	
37	(16)		79	(16)		121	(16)	
38	(17)		80	(17)		122	(17)	
39	(18)		81	(18)		123	(18)	
40	(19)		82	(19)		124	(19)	
41	(20)		83	(20)		125	(20)	
42	(21)		84	(21)		126	(21)	

8 風向別風速の再現期間を 100 年, 150 年, 200 年とした場合の設計軸力に対する年超過確率の検討結果 (年超過確率の逆数である再現期間にて表示) を Fig.7 に示す。同図からもわかるように, 再現期間は風向特性, 架線状態に大きく影響を受ける。年超過確率が, 概ね 0.02 以下 (軸力の再現期間が 50 年以上) となるのは, 8 風向別風速の再現期間を 150 年以上とした場合となっている。

再現期間の特徴を整理すると以下の通りである。

- 1) 再現期間が相対的に長くなるケースは, 荷重効果が大きい風向の風速が大きく, 荷重効果の小さい風向の風速が小さい場合。
- 2) 再現期間が短くなるケースは, 1) と正反対の場合。および風向による荷重効果の影響が相対的に小さい直線鉄塔で各風向の風速に差異のない場合。

例えば架線ケース[3]で風向・風速分布が(11)(12)(13)となるケース 53,54,55 は, 南からの風による荷重効果が大きく, かつ南からの風速が大きいため, 再現期間は長くなっている。一方, 架線状態は同じで風向・風速分布が(7)(8)(9)となるケース 49,50,51 は, 南からの風による荷重効果が大きい, 南からの風速が小さいため, 再現期間は概ね前者の 1/2 程度となっている。また, 架線ケースが[1][2]となる直線鉄塔は, 風向・風速分布が(1)(14)の場合, すなわちケース 1,14,22,35 では再現期間は総じて短くなっている。

a) 風向別再現期間を 100 年として設定した場合

b) 風向別再現期間を 150 年として設定した場合

c) 風向別再現期間を 200 年として設定した場合

Fig.7 設計軸力の年超過確率（再現期間表示）
Return periods of design axial forces

2.4 風向別基本風速の上限値の設定

8 風向別風速の再現期間を 150 年として設定した場合、前述のとおり架線条件、風向・風速分布の組み合わせによって設計軸力に対する年超過確率に大きなば

らつきを生じている．年超過確率の小さな，すなわち再現期間が大きくなるケースの再現期間を小さくすることができれば目標とする安全性により近づくことが可能となると考えられる．このため，風向別風速が

全風向の 50 年再現期間風速を超える風向について、この風速によって上限を設けた場合と設けない場合について比較することを試みた。

全風向 50 年再現期間風速は、各 8 風向の風速の発生確率は互いに独立と仮定し、全風向風速の年超過確率が 0.02 となる風速値として算出した。傾き $1/a=3.0$ の場合、全風向の 50 年再現期間風速は以下のようになる。

風向別風速の分布ケース(1)：42.9m/s

風向別風速の分布ケース(2)～(5)：39.8m/s

風向別風速の分布ケース(6)～(13)：38.0m/s

風向別風速の分布ケース(14)～(21)：41.7m/s

したがって、全風向 50 年再現期間風速を上回るのは、の分布ケース(2)～(5)と の分布ケース(6)～(13)の風速 40m/s が設定された風向となる。また、同様に傾き $1/a=4.0$ の場合、全風向の 50 年再現期間風速は、

風向別風速の分布ケース(1)：43.8m/s

風向別風速の分布ケース(2)～(5)：40.3m/s

風向別風速の分布ケース(6)～(13)：38.3m/s

風向別風速の分布ケース(14)～(21)：42.5m/s

となり、全風向 50 年再現期間風速を上回るのは、の分布ケース(6)～(13)の風速 40m/s が設定された風向となる。

再現期間 150 年の風向別風速に対して、全風向 50 年再現期間風速による上限を設けない場合(×印)と、上限を設けた場合(○印)の年超過確率(再現期間表示)を比較した結果を Fig.8 に示す。全風向 50 年再現期間風速による上限を設けた場合、特に風向別風速の分布ケース(6)～(13)については、設計風速の低減率が大きいことから再現期間の低減が大きい、目標としている 50 年を下回るものは認められない。

風向別風速の再現期間を 150 年としたときの年超過確率は、Gumbel 分布の直線の傾き、全風向 50 年再現期間風速による上限の有無により以下のように整理される。

全風向 50 年再現期間値による上限無しの場合

傾き $1/a=3.0$ ：52～357 年

傾き $1/a=4.0$ ：48～250 年

全風向 50 年再現期間値による上限有りの場合

傾き $1/a=3.0$ ：52～312 年

傾き $1/a=4.0$ ：48～212 年

全風向の 50 年再現期間風速により上限値を設けた場合、再現期間が長く評価されていたケースに、その低減が見られたものの、新たに 50 年を下回るものは見られず、再現期間のばらつきを小さくできることがわかった。以上の結果から、本論文では 8 風向別基本風速の再現期間は 150 年とし、かつ全風向の 50 年再現期間風速による上限値を設けることとして以降の展開を図るものとする。

なお、ここでは Gumbel 分布の直線の傾き $1/a$ は代表値を用い、風向別風速の分布ケースは限られたものとしているが、地点毎、風向毎に個別に設定することにより、風向別風速の再現期間を求めることが可能であり、今後の課題として位置づけられる。また、風向別風速の再現期間は各風向で一律として荷重を評価する方法を提案しているため、架線状態、風向別風速の分布によって、設計軸力に対する発生軸力の年超過確率がばらつきを有することとなる。これに対して、個別の建設地点を対象に、風向別風速の確率分布、風向別の荷重効果が明確であるならば、風向毎に異なる風向別風速の再現期間を設定することで、目標とする年超過確率に合致させるような荷重評価も可能であろう。

a) 風向別風速の Gumbel 分布の傾きが 3.0 の場合

Fig.8 風向別風速の再現期間を 150 年としたときの設計軸力の年超過確率(再現期間表示)(続く)
Return periods of design axial forces, when return period of directional wind speed is 150 years

b) 風向別風速の Gumbel 分布の傾きが 4.0 の場合

Fig.8 風向別風速の再現期間を 150 年としたときの設計軸力の年超過確率 (再現期間表示)
Return periods of design axial forces, when return period of directional wind speed is 150 years

3 官署位置における風向別基本風速の算定

3.1 風向別基本風速算定の考え方と算定手順

本論文において風向別基本風速は、地表面粗度区分、地上高さ 10m における 10 分間平均風速の 8 風向別 150 年再現期間風速と定義する。さらに、風向別基本風速は、建設地点における台風の襲来頻度や季節風の発生頻度、緯度・経度や、山脈・半島あるいは海からの距離などの大規模な地形の影響を反映し、周辺 10km 四方程度を代表するものとして、以後の議論を展開する。

送電線は鉄塔と架渉線からなる構造物であり、架渉線張力による荷重は温度の影響を強く受けることから、通常、気温の条件を考慮した設計がなされている。したがって、一年を、夏から秋にかけての季節に発生する強風（主として台風を想定）を考慮した期間、および冬から春にかけての季節に発生する強風（主として冬季季節風を想定）を考慮した期間に分類し、文献 2) に従い、それぞれ高温季、低温季と称することとした。

基本風速の算定にあたり、官署における風向・風速の観測データが基本となるが、風向別に基本風速を定める場合には、高々 50 年程度の官署における観測データ、特に台風時データについては、8 風向別とすることによるデータ不足は明らかであり、信頼性の高い統計値を算出することは難しい。このため、例えば ASCE7-02³⁾では、地域によっては基本風速を定める時にハリケーンの観測データは使用しないこととし、ハリケーン・シミュレーションによって定めるよう提唱している。一方で、観測データは、実測値であるため一般社会に対する強い説得力を有していることも確か

である。

また、極値統計解析上の問題点として、実際の官署における観測記録が、理論上漸近するはずの極値の漸近線に従わないことがしばしばみられ、再現期間の外挿に疑問がもたれている。例えば、Gomes & Vickery¹¹⁾は、複数の成因からなる年最大風速の確率分布は複数の極値分布の合成になることを示し、従来の一つの極値分布を用いる場合には再現期間の大きな範囲では、過小評価になる可能性を指摘している。

本論文では、以上に述べた課題に対処するため、高温季については、官署観測データを成因別（台風と非台風）に整理することにより、データの統計解析上の問題点を排除し、さらに台風時データについては、文献 12), 13) に示された台風モデルによるモンテカルロシミュレーション（以下、台風シミュレーション）によって得られた風速値を、観測値でキャリブレーションするという併用方法を提案する。

台風シミュレーションは、台風の確率モデルの妥当性、傾度風から地上風に変換する際の精度などの課題が挙げられ、シミュレーション結果の絶対値評価に対する信頼性には若干疑問がある。しかしながら台風モデルを規定する物理量（台風の発生頻度、進行速度、最大旋衡風速半径、中心気圧低下量など）は、偶然性の大きい風速の観測記録よりは信頼性が高いこと、長期間（例えば 10000 年）のシミュレーションが可能で、サンプリングエラーを回避できることなどの利点を有する。このため、本論文では、台風の襲来頻度の少ない地域を除き、各風向相互の風速値の相対関係については、観測データよりは信頼性が高いものと判断し、

観測データと台風シミュレーションから求めた全風向の150年再現期間風速の比率（観測データ／台風シミュレーション）を、台風シミュレーションから求めた風向別150年再現期間風速の分布形に掛けあわせる方法を採用することとした。これにより、地域的な風速レベルは観測データに、風向別風速の分布形は台風シミュレーションに基づいた設定となり、観測データと台風シミュレーションの長所を取り入れた設定が可能であると判断した。

また、官署の風向によっては再現期間風速が台風時よりも非台風時の方が上回る場合もあることから、いずれか大きい方を採用することとした。ただし、台風時の再現期間風速と非台風時の再現期間風速が接近する場合は、本手法で求めた風速値は再現期間が過小評価となる可能性があり、この手法の課題の一つとしてあげられる。今後、台風シミュレーションの絶対値評価に対する信頼性が向上すれば、台風時と非台風時の風速の確率分布を合成することで、所定の再現期間に

対する風速を求めることも可能であろう。

官署における風向別基本風速の算定手順は、Fig.9に示すフロー図のとおりである。高温季は、観測データに基づく全風向150年再現期間風速を V_2 、台風シミュレーションによる全風向150年再現期間風速を V_4 とし、これらの比率 $\alpha = V_2 / V_4$ をとり、これを台風シミュレーションによる8風向別150年再現期間風速 $V_{5.i}$ に乘じる。次に観測データに基づく非台風150年再現期間風速 $V_{3.i}$ と $V_{5.i}$ を比較し大なる方をその風向の値 $U_{o.i}$ とするが、上限値として観測に基づく全風向50年再現期間風速 V_1 を設定する。なお、台風シミュレーションの結果を用いない官署は、観測データのみにより設定する。

一方、低温季は、観測データに基づく全風向150年再現期間風速を V_2 とし、観測データに基づく風向別150年再現期間風速 $V_{3.i}$ をその風向の値 $U_{o.i}$ とするが、上限値として観測に基づく全風向50年再現期間風速 V_1 を設定する。

Fig.9 風向別基本風速の設定フロー
Flow chart for the estimation of directional basic wind speeds

また、官署における観測データは、直近の小地形の影響を受けている場合、官署の周辺地域を代表する風速となっていない可能性がある。このため、風向別に算定した小地形による風速の割り増し係数 k_l (ただし $k_l = 1.0$) ¹⁴⁾ によって風速を割り戻すことにより、直近の小地形による増速影響を除去し、危険側の評価になる可能性を排除した。

3.2 官署における風観測データの処理方法

官署の風観測値によって求める再現期間風速 $V_1, V_2, V_{3,i}$ の具体的な算出方法とその結果について、以下に述べる。

(1) 利用した資料と風向・風速データの抽出

利用した資料と抽出したデータは以下の通りである。

気象庁月報から、日最大風速とその時の風向を抽出 (1951-1960)。

気象庁年報から、3 時間毎の正時風速とその時の風向 (1961-1990)、毎正時風速とその時の風向 (1991-2000) および日最大風速とその時の風向 (1961-2000) を抽出。

アメダス観測年報から、官署位置における毎正時風速とその時の風向 (1976-1990) を抽出。これにより 1976 ~ 1990 年までの 3 時間毎の正時風速データを補完。

月表、日原簿から、台風接近時の 6 時間毎の正時風速とその時の風向を抽出 (1951-1960)。これにより 1951 ~ 1960 年までの日最大風速を補完。

(2) 風観測データの処理手順と処理方法

a) 各 16 風向の季別年最大風速の抽出

各年の毎日の毎正時 (または 3 時間毎の) 風速および日最大風速から、風向毎に季別最大値を抽出し、季別年最大風速とする。なお、上記処理には後述する風速計高さ補正を先に見込み、高さ 10m 位置の風速として扱う。

b) 風速値の補正 (測器、地表面粗度、風速計高さ)

風速計の変遷に伴う風速の測器補正は、風車型風速計を基準風速計とし、データの均質性を確保した。1951 ~ 1960 年は風速計が 4 杯式であるため、風洞実験公式を考慮する前の測定値に戻した値に 0.91 を乗ずるものとした。また、1961 ~ 1974 年は風速計が 3 杯式であり、風速値に 0.91 を乗ずるものとした。

次に、風速計の高さや周辺の地表面粗度は官署毎に異なることから、風速計高さの基準化 (地上 10m) と地表面粗度の基準化 (粗度区分) を行った。地表面粗度区分に対する平均風速の鉛直分布は、文献 3) に示されている式と定数を使用し、粗度に応じた上空風高さとのべき指数で表すこととした。

また、官署周囲の地表面粗度の経時変化については、最近の昭和 60 年次の他に、昭和 50 年次及び昭和 40 年次における官署周りを撮影した写真を利用して検討した。これより年次別の 8 風向別の各地表面粗度を周辺地域の地表面の状況に応じて、文献 3) に示されている地表面粗度区分 (~) と、さらにその中間値も加えて、合計 9 区分として地表面粗度を読み取った。16 風向毎の粗度を求めるにあたっては、読み取った 8 風向と一致しない中間にある風向は、両隣の地表面粗度の平均値とし、また各年は各年次間を線形内挿した。なお、昭和 40 年次以前ならびに昭和 60 年次以降は地表面粗度区分は一律とした。

c) 16 風向別データから 8 風向別データへの集約

風向の設定は 8 風向としているが、16 風向のときの中間に位置する風向、例えば NNE は 8 風向の時の N 又は NE として分離することができないため、観測された 16 風向のうち、隣り合う風向を含めた 3 風向の最大値を、当該風向の風速として集約することとした。したがって、統計的な厳密性は失われるものの、厳密な意味で 8 風向に分割して求めた風速値よりも相対的に大きめの値を与える可能性がある。

d) 直近の小地形の影響を除去するための風速補正

直近の小地形の影響を除去するため、各風向の風速値を風向毎に設定した小地形による割り増し係数 k_l により除することとした。風向毎の k_l の設定にあたっては、50m メッシュの標高データを使用し、まず官署位置を中心に水平方向 1 度毎に k_l を 360 度算定し、8 風向に分割した 1 風向の 45 度内の最低値を求め、その風向の代表値として採用した。

e) 全風向の季別年最大風速の抽出

上記処理によって抽出、補正された風向別の年最大風速から、風向を考慮しない全風向の季別年最大風速を抽出した。

f) 全風向および各風向の季別再現期間風速の算出

年最大風速の再現期間値を算定するにあたり、Gumbel 分布に従うものとし、観測データの経験的

非超過確率は，Thomas の方法を用いた．

台風時以外のデータは，最大風速 U の非超過確率は最小自乗法により Gumbel 分布にあてはめ，再現期間風速を求めることとした．

一方，台風時データは松井ら¹⁵⁾の手法に従い，台風時の最大風速 U の非超過確率 $F_T(U)$ を，1 つの台風時の最大風速の非超過確率 $F_{T1}(U)$ を用いて表し，最小自乗法によりあてはめた．ここで，1 つの台風時の最大風速の非超過確率 $F_{T1}(U)$ は，Gumbel 分布を用いた． m は，全風向の場合は年平均台風接近数，風向別の場合は該当する風向の風を生じさせる台風の年平均個数を表し，これらは官署毎に 50 年間の台風経路より算出した．

$$F_T(U) = \exp[-m\{1 - F_{T1}(U)\}] \quad (6)$$

$$F_{T1}(U) = \exp[-\exp\{-a(U - b)\}] \quad (7)$$

式(6)，(7)より，式(8)を得る．

$$U = b + \frac{1}{a} \left\langle -\ln \left\{ -\ln \left[1 + \frac{1}{m} \ln F_T(U) \right] \right\} \right\rangle \quad (8)$$

高温季において，台風時データと非台風時データの両者の成因によって合成された最大風速 U の非超過確率 $F_c(U)$ は，両者が互いに独立な事象とすれば，両者の非超過確率の積で表され，式(9)を得る．ここに， $F_s(U)$ は，非台風時データの非超過確率を表す．

$$F_c(U) = F_s(U)F_T(U) \quad (9)$$

上記 a) ~ f) の手順によって得られた回帰式により，全風向および各風向の再現期間風速を算出することとし，各官署における風観測データの処理を行った．

処理結果の一例として，宮崎地方気象台における南東風の Gumbel 確率紙上の年最大風速プロットの例を Fig.10，Fig.11 に示す．Fig.10 では台風時データと非台風時データそれぞれの特性から求めた合成曲線が，非分離のデータに良く対応していることが確認できる．

3.3 台風シミュレーションによる風向別再現期間風速の算定

台風シミュレーションによって求める再現期間風速 V_4 ， V_{5-i} の具体的な算出方法とその結果について，以下に述べる．ここで用いた台風シミュレーションは，光田，藤井^{12),13)}の台風確率モデルを 1951 ~ 1999 年の

Fig.10 Gumbel 確率紙上の年最大風速プロットの例
(南東風，高温季，宮崎)
Example of annual maximum wind speeds on Gumbel probability paper(South-East wind, high temperature season, Miyazaki)

Fig.11 Gumbel 確率紙上の年最大風速プロットの例
(南東風，低温季，宮崎)
Example of annual maximum wind speeds on Gumbel probability paper(South-East wind, low temperature season, Miyazaki)

台風時の気象観測データに基づいて再評価して官署位置における傾度風を求め，さらに傾度風と地上風の風向相関，風速比相関を用いて地上風を算定するものである．

(1) 台風シミュレーションの概要

台風シミュレーションによって長期間の風向，風速データを作成する手順は以下に示す通りであり，Fig.12 に地上風を算定する概念図を示す．

シミュレーション領域の決定

台風の年間発生個数の決定

台風発生時の中心位置（緯度，経度）の決定

中心気圧低下量 Δp の決定

進行速度及び進行方向の決定

最大旋衡風速半径 r_m の決定

対象地点の傾度風の風向，風速の決定

風向，風速比相関より地上風の風向，風速を算定

上記手順で得られた官署位置における長期間の風向・風速データに対して統計処理を行い、8 風向別再現期間風速を算定した。

Fig.12 台風シミュレーションによる風向別風速の算定方法

Calculation process of directional basic wind speed by typhoon simulation

(2) 台風パラメータの確率モデル

台風の確率モデル作成にあたっては、光田、藤井の方法^{12),13)}に従って、1951～1999年の台風時の気象観測データに基づいて再評価を行った。

a) 検討領域

検討領域は、北緯 23 度～43 度、東経 123 度～147 度とし、台風発生時および台風移動時の領域分割は、文献 12)に従った。

b) 台風初期統計量

検討領域内に、最低中心気圧が 980hPa 以下で進入、あるいは 980hPa 以下に発達した台風数、位置（緯度 ϕ 経度 λ ）、中心気圧低下量 Δp 、進行速度（東向き c_x 、北向き c_y ）を求め、 ϕ は指数分布、 λ は一様分布、 Δp 、 c_x 、 c_y は対数正規分布で表すこととし、これらの確率モデルを求めた。また、検討領域内での台風の年間発生数の平均値は 8.1 個であり、これを平均値 8.1 のポアソン分布で近似した。

c) 台風移動時統計量

検討領域を分割した各区ブロック内の Δp 、 c_x 、 c_y の推移が、前後 1 時間の値の間に、式(10)に示す関係があるものと仮定し、それぞれのパラメータについて回帰係数と誤差の標準偏差 σ_e を求めた。なお、光田、藤井は、 Δp の時間変化量を正規分布としてモデル化している。

$$X_{new} = c_1 X_{old} + c_2 + e \quad (10)$$

ここに、

X_{new} : 現時点での値

X_{old} : 1 時間前の値

c_1, c_2 : 回帰係数

e : 誤差

なお、台風シミュレーション時には、 e は平均値 0、標準偏差 σ_e の正規乱数として与えることとした。

d) 台風接近時の周辺気圧、最大旋衡風速半径

最大旋衡風速半径のモデル化を行うため、台風中心から 100km 内に官署が少なくとも 1 つ入り、かつ 500km 圏内に 4 箇所以上の官署が入るケースを対象として、海面気圧データを収集した。これらのデータより、各台風の 3 時間ごとの気圧分布を求め、Schloemer の気圧分布式の最小自乗近似により最大旋衡風速半径 r_m と周辺気圧 p_n を求めた。ここでは、周辺気圧 p_n から中心気圧 p_c を差し引いた気圧低下量 $\Delta p_e (=p_n - p_c)$ を 30hPa 未満、30hPa 以上 45hPa 未満、45hPa 以上の 3 区分に分類して、 r_m を対数正規分布でモデル化した。

(3) 官署における傾度風と観測風の風向・風速比相関

台風接近時の官署位置における傾度風と地上風の風向、風速比の相関モデルを作成するため、各官署を中心として半径 500km 以内を通過した台風を抽出し、個々の台風について 3 時間ごとの風向、風速データを収集した。傾度風の風向は、台風の気圧分布が同心円状と仮定し、台風中心から官署へ向けたベクトルに対して直交左回りの方向とした。傾度風の風速 V_{gr} は、Schloemer の気圧分布式と Blaton の公式により、台風の移動速度を考慮して求めた。

a) 風向相関

風向相関は、田村らの方法¹⁶⁾により求めることとした。官署における傾度風と観測風の風向相関マトリクスの例を Table 3 に示す。なお、検討したデータは、観測風速 5m/s 以上のデータを対象とした。

台風シミュレーション時には、地上風の風向は傾度風向に対する地上風の出現頻度に応じ一様乱数を用いて計算ステップ毎に求めることとした。

Table 3 台風接近時の傾度風向に対する観測風向(地上風向)の発生頻度の例(宮崎)
Correlation between observed wind direction and friction free wind direction at Miyazaki

		観測風															
		NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
傾度風	NNE	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	8	12
	NE	18	24	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	15
	ENE	33	49	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4
	E	9	30	45	17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ESE	4	14	40	54	20	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SE	0	4	9	40	62	24	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	SSE	0	0	0	3	28	50	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	S	0	0	0	0	7	31	28	5	3	0	0	0	0	0	0	0
	SSW	0	0	0	0	1	6	10	15	4	0	0	0	0	0	0	0
	SW	0	0	0	0	0	4	12	3	1	1	0	0	0	0	0	0
	WSW	0	0	0	1	0	0	4	8	12	4	0	0	0	0	0	0
	W	0	0	0	0	0	0	1	1	4	18	13	0	1	0	0	0
	WNW	0	0	0	0	0	0	0	0	2	15	9	0	0	0	0	0
	NW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	32	4	0	0	0	0
	NNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	21	9	5	0	0	0
	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	5	4	5	1	1

b) 風速比相関

傾度風と観測風の風速比相関を検討するにあたっては、観測風速が 5m/s 以上、かつ算定された傾度風速が 10m/s 以上となる時のデータを対象とし、風向毎の風速比(観測風/傾度風)を利用した。なお、観測風は、3.2 に示した風速値の補正方法により基準化した。

官署における地上風向に対する風速比の統計量は、地物の影響を受けやすい地上風を基準とし、隣り合う風向を含め 3 風向分のデータを用いて算定することとした。算定した風速比の平均値と標準偏差の例を Fig.13 に示す。

Fig.13 風速比相関の例(宮崎)
Correlation between observed wind speed and friction free wind speed at Miyazaki

台風シミュレーション時には、地上風速の算出は、地上風向に応じた風速比の平均値、標準偏差を用いて式(11)により求めることとした。

$$V_e = V_{gr}(\sigma_c X + A) \quad (11)$$

ここに、

V_e : 地上風速

V_{gr} : 傾度風速

σ_c : 風向別風速比の標準偏差

A : 風向別風速比の平均値

X : 標準正規乱数

(4) 台風シミュレーションによる風向別風速の算定

1951～1999 年までの台風観測結果に基づく台風確率モデルの検討結果、および官署における傾度風と地上風の風向相関、風速比相関検討結果を反映した台風シミュレーションコードを用いて、各官署における全風向、および風向別の再現期間風速を求めた。なお、風向相関、風速比相関は計算のステップ毎に独立に与えることとした。

地上風の算定に際し、シミュレーション期間は 10000 年、個々の台風の計算のステップは 1 時間とした。また、官署と台風中心間の距離が 500km 以内に接近した場合、計算のステップは 10 分とし、官署における風向、風速を算定することとした。

風向別風速は、官署における風観測データの処理方法に準じて 8 風向としてまとめ、再現期間風速の算定にあたっては、所定の再現期間に相当する規準化変数の値に基づいて算定した。

計算結果として、Gumbel 確率紙上の年最大風速のプロットの例を Fig.14 に、また、Fig.15 に各官署における全風向の観測と台風シミュレーションの 150 年再現期間風速の比較結果を示す。この結果より、個別にみると多少の差異はみられるものの、両者は概ねよく対応しているものと考えられる。なお、観測値と台風シミュレーション結果との全風向 150 年再現期間風速の比(台風シミュレーション/観測)は全官署の平均で 1.08、地域別で見ると、北海道 0.99、東北 1.20、関東 1.20、中部 1.14、近畿 1.04、中国 1.05、四国 1.00、九州 0.98、沖縄 1.04 であった。

なお、台風シミュレーションで用いている風速比相関の有効データ数が 48 個未満(16 風向×平均 3 個)と少ない官署、および風向相関・風速比相関の分布形の偏り等により風速が算定できない風向がある官署については、台風シミュレーションの適用範囲を逸脱しているものと判断し、台風シミュレーションのデータを用いないこととした。台風シミュレーション結果を適用しない官署を、台風シミュレーションの適用領域外の官署(北緯 43 度以北の官署)とともに、Table 4 に示す。

Fig.14 台風シミュレーションによる Gumbel 確率紙上の年最大風速プロットの例 (宮崎)

Example of annual maximum wind speeds by typhoon simulation on Gumbel probability paper (Miyazaki)

Table 4 台風シミュレーションの適用しない官署とその分類

Meteorological stations which do not apply the typhoon simulation and the categories

分類	官署名
北緯43度以北の官署	稚内, 北見枝幸, 羽幌, 雄武, 留萌, 旭川, 網走, 小樽, 札幌, 紋別, 岩見沢, 根室
風速比相関の有効データ数が48個未満の官署	帯広, 釧路, 寿都, 室蘭, 苫小牧, 浦河, 江差, 函館, 倶知安, 広尾, 大船渡, 新庄, 若松, 深浦, 青森, むつ, 八戸, 秋田, 盛岡, 宮古, 山形, 福島, 秩父, 甲府, 軽井沢, 飯田, 高田, 高山
台風シミュレーションで風速を定義できない風向のある官署	富山, 松本, 日光

3.4 官署位置における風向別風速算定結果と考察

上記検討手法によって求めた官署位置における風向別基本風速の算定例を Fig.16 に示す。観測値のみによって求めた値も併記した。算定した風向別基本風速について、宮崎、千葉、高知の官署を対象に、観測値のみから求めた値との違いを示す。

宮崎

官署は東側約 4～5km にほぼ南北に海岸線が走り、平野部に位置している。算定した風向別基本風速は、東西系の風速が卓越しており、観測値のみによって求めた値に比べ、北から西の値は最大 10m/s 程度大きい値を示した。また海から吹いてくる東風と山地から吹いてくる西風の基本風速はほぼ同程度の値となっている。これは風速比相関の影響が反映されたものであり、西側の主要な山地まで 10 数 km 離れていることから、地形による風速比の差異が生じなかったためであると考えられる。

高知

官署から南南東の方位には約 7km 離れて東北東から西南西に海岸線が走り、官署の南東側には河口が存在している。また西側から北東側 3～5km 程度以上の領域は山岳部である。算定した風向別基本風速は、東から南東が卓越しており、河口に面する南系の風速が大きく、山岳部が存在する北西からの風速が小さくなっている。したがって、本手法によって求めた風向別基本風速は、観測値のみによって求めた値に比べ、大規模な地形の影響がより反映できているものと考えられる。

千葉

官署は南から北西側に湾を臨み、平野部に位置している。算定した風向別基本風速は、風向によらずほぼ一定値を示している。官署周辺に風速に影響を及ぼす顕著な地形が存在しないことから、風向によらずほぼ一定値を示した。一方、算定値に比べ観測値のみによって求めた値は北東および西が 5m/s 程度小さくなっている。

Fig.15 官署における全風向 150 年再現期間風速の比較 (九州、沖縄地方)

Comparison of non-directional wind speed of 150-years return period at meteorological stations

(Kyushu and Okinawa region)

Fig.16 風向別基本風速の算定結果の例 (高温季)

Examples of estimation results of directional basic wind (High temperature season)

以上のように、台風シミュレーションを用いた本手法は、観測値のみによって求めた風向別基本風速に比べ、データのサンプリングエラーがなく、より実態を反映しているものと考えられる。一方、ここで求めた風向別基本風速は、官署周辺の地域を代表する大規模な地形の影響を反映したものとして扱っているが、官署によっては地形の影響だけでは説明できないケースもみられる。今後、地表面粗度の評価、地形による風向、風速プロファイルへの影響および台風シミュレーションなど個々の要素に対する精度の向上を図ることが課題として挙げられる。

また、風向別風速データの少ない官署や台風襲来頻度の少ない地域では、今回求めた風向別基本風速は相対的に精度が低くなっている可能性も考えられる。

4 結 論

送電用鉄塔の合理的な設計および精緻な信頼性評価のため、本論文では官署における風向別基本風速の検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

(1)送電線の架線条件と風向別風速の分布ケースによるパラメトリックスタディーから、送電用鉄塔の部材軸力の年超過確率を 0.02 とした場合、8 風向別風速の再現期間として 150 年を採用するのが妥当である。また、全風向の 50 年再現期間風速により上限値を設けることにより、部材軸力の再現期間が大きいケースについて目標とする安全性に近づけることができ、全体としてのばらつきを抑えることが可能となることがわかった。

(2)基本風速の算定にあたっては、官署で観測された 50 年間のデータを高温季、低温季で分類し、さらに高温季にあつては、成因別(台風と非台風)に整理して、台風時データは台風シミュレーションによって得られた風速値を観測値でキャリブレーションする手法を提案した。本手法によって求めた風向別基本風速は、観測値によって求めた値に対して差異を生じるが、これはデータのサンプリングエラーを回避できる台風シミュレーションによってより実態に近い値を与えたためと考えられる。

5 今後の課題

今後の課題としては以下の点が挙げられる。

- (1)風向別風速の再現期間を設定する際、Gumbel 分布の直線の傾き $1/a$ は代表値を用い、風向別風速の分布ケースは限られたものとしているが、地点毎、風向毎に個別に設定することにより、風向別風速の再現期間を求めることが可能であろう。
- (2)地表面粗度の評価、地形による風向、風速プロファイルへの影響、および台風シミュレーションなど、個々の要素の精度向上を図ることが望まれる。
- (3)特に、台風シミュレーションの絶対値評価に対する信頼性が向上すれば、台風時と非台風時の風速の確率分布を合成することで、所定の再現期間に対する風速を求めることも可能であろう。
- (4)風向別風速データの少ない官署や台風襲来頻度の少ない地域では、今回求めた風向別基本風速は相対的に精度が低くなっている可能性も考えられ、

今後も継続したデータの蓄積と評価が必要である
う。

謝辞

本研究は、(財)電力中央研究所が電気事業連合会より依頼を受けて実施した「耐風設計合理化研究」の一環として行われたものであり、本研究を実施するに当たり、「耐風設計合理化委員会」(平成11年4月～平成14年3月:大熊武司委員長(神奈川大学))においてご指導いただいた委員各位に深く感謝いたします。また台風シミュレーションについて、貴重なご意見をいただいた東京工芸大学工学部建築学科助教授・松井正宏氏に謝意を表します。

参考文献

- 1)経済産業省:電気設備技術基準・解釈,オーム社, 424p., 2002
- 2)電気学会:送電用支持物設計標準 JEC-127, 177p., 1979.
- 3)日本建築学会:建築物荷重指針・同解説, 512p., 1993
- 4)ASCE:Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures(ASCE7-02),376p.,2002
- 5)Australian Standard : SAA Loading Code, Part2:Wind loads,AS 1170.2-1989,90p.,1989
- 6)神田順: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
- 7)藤野陽三,伊藤学,田村敬一:風向を考慮した風速統計に関する研究,風工学シンポジウム, pp.31-38, 1982
- 8)松本勝,白石成人,白土博通,築山有二: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.
- 9)日本建築学会構造委員会荷重運営委員会:建築物荷重指針改定案本文を公表し意見を問う, 2002 年度日本建築学会大会(北陸), 構造(荷重)部門パネルディスカッション資料, 69p., 2002
- 10)石川智巳:送電用鉄塔の動的効果を考慮した風荷重評価法に関する研究,土木学会論文集, 738/-64, pp.139-158, 2003
- 11)Gomes,L.,Vickery,B.J.: Extreme Wind Speeds in Mixed Wind Climates, Journal of Industrial Aerodynamics and Wind Engineering, 2,pp.331-344, 1978
- 12)藤井健,光田寧:台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第 29 号 B-1, pp.229-239, 1986
- 13)光田寧,藤井健:日本南方洋上における台風の確率モデルの作成, 京都大学防災研究所年報, 第 32 号 B-1, pp.335-348, 1989
- 14)中村秀治,田中伸和,中園信,松山彰,友延信幸:特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究(その2)特殊地形の簡易判定法と気流シミュレーションに基づく設計風速の算定法,日本風工学会論文集,第 82 号 pp.49-60, 2000
- 15)松井正宏:構造物の耐風設計における台風モデルを用いた風速の評価とその応用に関する研究, 京都大学博士論文, 164p., 1999
- 16)田村幸雄,後藤周平,渡辺泰志:台風シミュレーションを用いた建築物の設計風速評価 風向相関法に基づく風向係数の算定—, 構造物の安全性および信頼性, JCROSSAR'95 論文集, pp.483-486, 1995