

## Appendix A: 基本風速の設定法

### 1. 平均風速の頻度分布

特定の地点における平均風速値の分布は、次に示すワイブル分布によく従うことが確かめられている。

[累積分布関数]

$$F_V(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

[確率密度関数]

$$f_V(V) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

ここで、 $k, c$  はそれぞれ形状パラメーター、尺度パラメーターである。

ワイブル分布における平均値と分散値は  $k$  と  $c$  を用いて次のように表すことができ、またこの関係を使うことで、観測値から  $k$  と  $c$  を求めることが出来る。

$$\mu_V = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right), \quad \sigma_V^2 = c^2\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right] \quad (3), (4)$$

ここで、 $\Gamma(\quad)$  は、ガンマ関数である。

図 1 は、比較的風の強い寿都(北海道)と室戸岬で観測された平均風速の頻度分布をワイブル分布と重ね合わせたものである。図より、ワイブル分布によって風速の頻度分布がよく表されていることが判る。

日本の気象官署で計測された風速データを解析した結果では、形状パラメーター  $k$  は概ね 2 程度になることが示されている。なお、大気の動きを等方性 2 次元乱流とみなし、地面に平行な風速成分が正規分布に従うと仮定すると、 $k = 2$  としたレーリー分布となることが理論的にも証明される。(松本先生)

また、道路橋耐風設計便覧においては、全国の気象官署のデータから次式を風速頻度モデル式として示している。

$$P(U) = \exp\left[-\left(\frac{U}{0.166U_{50}}\right)^{1.46}\right] \quad (3)$$

ここで、 $P(U)$  は 10 分間平均風速が  $U$  を超える確率、 $U_{50}$  は風速の 50 年再現期待値 ( $U_d/1.07$  としてもよい) である。

さらに、風速の頻度分布においては、年最大風速の再現期待風速と異なり、大きな母集団サイズとなることから、風向別に風速頻度分布モデルを作成することができる。特に、構造物の空力振動の場合には、風向によってその発現特性が大きく変わることから、空力振動による構造物の疲労を検討する場合に有効である。

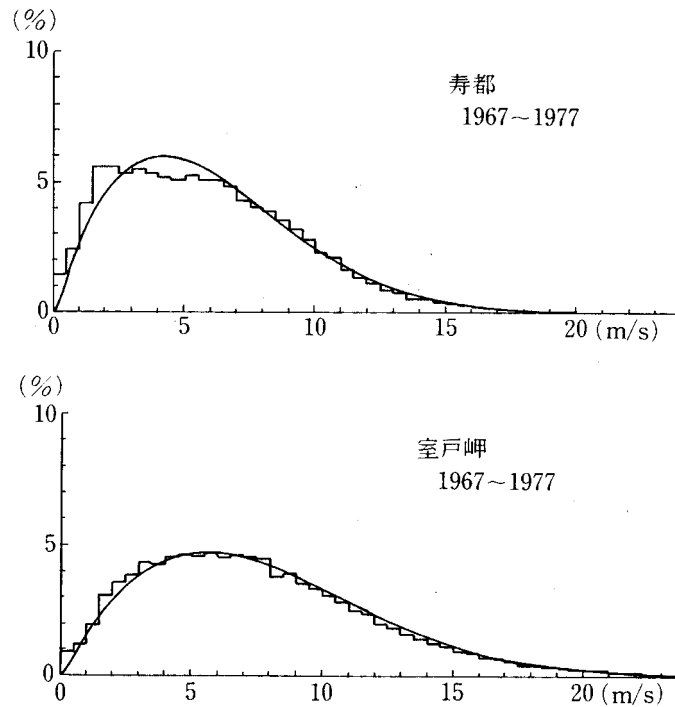


図 1 平均風速の頻度分布のワイブル分布へのあてはめ (構造物の耐風工学)

## 2 . 年最大風速の分布

土木構造物は、通常数十年あるいは 100 年のオーダーで寿命を考えるため、基本風速は例えば 100 年再現期待値というかたちで決められる。そして、これは通常、年最大風速データから決められる。年最大風速は、年ごとには変化するが、年々の気象現象は独立で、確率統計的には同質な不規則変量または確率変量と見なせる。

いま、変量  $x$  の同じ母集団からサイズ  $n$  の標本を  $N$  個取り出すことを考える。各標本における  $n$  個の離散変量  $x$  を順序統計量として、 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n$  のように並べた時、各標本での最大値  $x_n$  は標本のサイズ  $n$  が大きくなると、ある分布に漸近する。このような漸近極値分布については Fisher-Tippett が理論的研究を行い、母集団の性質によって 型から 型までの 3 種類の分布関数に分類している。

年最大風速に対する極値分布として最もよく用いられるものは、次に示す極値 型分布 (Gumbel 分布) である。これは、先に述べたように平均風速値の分布が指数型分布の一種であるワイブル分布に従うならば、その極値分布は 型分布となることが理論的にも証明されることによる。なお、年最大風速の極値分布形に関しては種々の議論があり、極値 型が理論的には負の値も含むため、むしろ 0 の下限を持つ極値 型 (Frechet 分布) のほうが妥当であるとか、自然風の風速には上限値があることから極値 型の適用も考えられるといったものであるが、ここでは確率論の詳細には立ち入らないこととする。また、強風の成因には、台風によるもののほか、季節風や温帯低気圧あるいは前線によるものなどがあるが、これらの異なる成因による強風ではその極値分布形も異なるといった研究成果も示されており、年最大風速データの取扱いには注意が必要である (この点に関しては、後に再度触れることとする)。

[極値 型累積分布関数]

$$F_V(V) = \exp[-\exp\{-\alpha(V-u)\}] \quad (4)$$

または、

$$F_S(s) = \exp[-\exp(-s)] , \quad s = \alpha(V-u) \quad (5)$$

ここで,  $\alpha, u$  はそれぞれスケールパラメーター, 位置パラメーターである.

### 3. 極値統計に解析による基本風速の設定

式(4)の両辺の自然対数を2回取ると,

$$V = u - \frac{1}{\alpha} \ln[-\ln(F_V(V))] = u + \frac{s}{\alpha}, \quad s = -\ln[-\ln(F_V(V))] \quad (6)$$

となる. すなわち, 縦軸に線形目盛の  $V$ , 横軸に線形目盛の  $s$  あるいは二重対数目盛での  $F(V)$  をとった図に年最大風速データをプロットすると, 直線で表されることを示している. このとき,  $s = 0$  すなわち  $F_V(V) = 1/e = 0.364$  のときの  $V$  の値が  $s$  であり, 直線の傾きが  $1/\alpha$  である. また,  $s$  のモーメントは平均値  $\mu_s = 0.577216\dots (= \gamma: \text{オイラー定数})$ , 分散  $\sigma_s^2 = \pi^2/6$  となることから, パラメーター  $\alpha, u$  との間に次の関係が導かれる.

$$\alpha = \frac{1.282}{\sigma_V}, \quad u = \bar{V} - 0.450\sigma_V \quad (7)$$

ここで,  $\bar{V}, \sigma_V$  はそれぞれ風速  $V$  の標本平均, 標本標準偏差である.

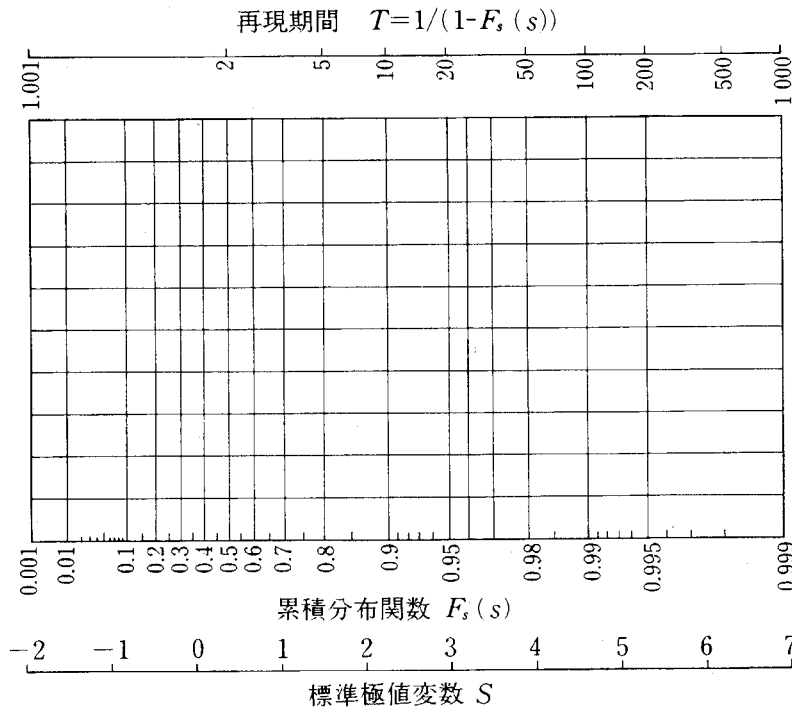


図2 二重指数確率紙(構造物の耐風工学 p422)

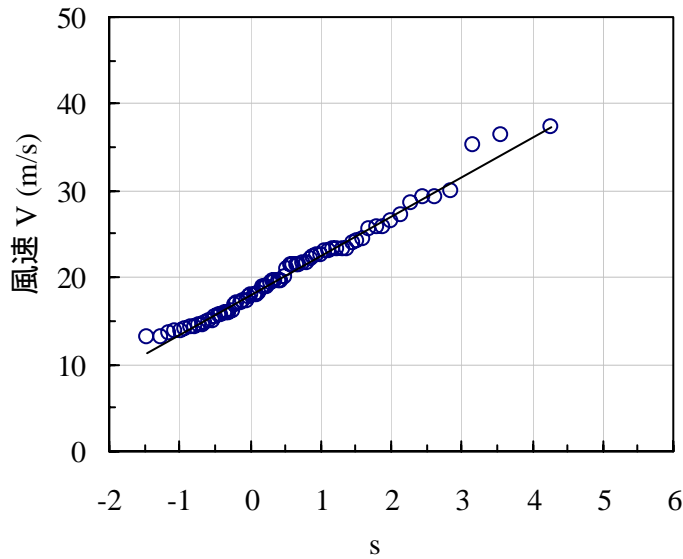


図3 ある気象官署での70年間の年最大風速データの二重指数確率紙へのプロット

ある極値が何年に一度の割合で生起するかを示す期間を再現期間といい、年最大風速  $V_T$  以上の強風が平均して  $T$  年に一度の割合で起きることが期待される場合に、この  $T$  年を年最大風速  $V_T$  の再現期間、 $V_T$  を  $T$  年再現期待値と呼ぶ。

次に、年最大風速の累積確率分布  $F_V(V)$  と再現期間  $T$  との関係は、 $1 - F_V(V)$  がある風速レベルを超えない非超過確率を表すことから、

$$T = \frac{1}{1 - F_V(V_T)} \quad (8)$$

と表される。

実際に観測された年最大風速の順序標本について再現期待値を求める場合、極値型分布を仮定して、標本平均と標本標準偏差から式(6)～(8)を用いれば、任意の再現期間に対する期待風速を求めることができる。また、順序標本を二重指数確率紙にプロットし、直線回帰を行うことでも再現期待風速を求めることができる。

後者の方法では、順序標本について大きい方から  $i$  番目の値を超過する確率  $P_i$  (経験的超過確率という) を求める必要があるが、経験的超過確率を求める方法にはいくつかのものがある。以下に代表的な方法を示す。

$$P_i = i/(n+1) \quad : \text{Gumbel の方法}$$

$$P_i = (i-1)/(n+1) \quad : \text{簡易 Pareto 法}$$

$$P_i = (2i-1)/2n \quad : \text{Hazen の方法}$$

$$P_i = (i-a)/(n+1-2a) \quad : \text{Gringorten の方法 (} a \text{ は定数で二重指数分布の場合には } 0.44 \text{)}$$

これらのうち菊地原はの Hazen の方法が最もよいとしている。

過去の風速記録から極値統計により基本風速を設定する際に、対象地点での風速記録がなく、構造物の建設に先立ち数年間の風観測が行われる場合がある。そのような場合には、近隣の気象官署等での同期間の風速データとの相関解析を行い、気象官署等のデータから得た再現期待風速値に相関係数を乗じることで、対象地点での基本風速の設定を行う方法もある。

また、再現期間が100年程度の基本風速を設定するにあたって、どのぐらいの期間の年最大風速データが必要かについては議論があるが、一般的には数十年の記録が用いられる。このような長期間のデータが得られない場合の代わる手法として、比較的短期間の風速データから再現期待値を

推定する Gomes&Vickery の方法がある。これは、Rice の閾値通過確率を適用し、平均風速の母集団分布 (weibull 分布) から再現期待風速を推定するものである。

$$U_R = U_1 + \frac{\ln R}{a} \quad (9)$$

$$\text{ここで, } U_1 = c \left[ \ln N + (k-1) \ln \left( \frac{U_1}{c} \right) \right]^{1/k}, \quad a = \frac{k}{c} \left( \frac{U_1}{c} \right)^{k-1} - \left( \frac{k-1}{U_1} \right), \quad N = 2\pi v_U \beta_U (k\sigma_U / c),$$

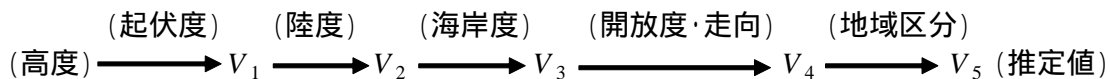
$U_R$ : 再現期待風速,  $R$ : 再現期間,  $k$  および  $c$ : ワイブルパラメーター,  $\sigma_U$ : 風速  $U$  の標準偏差,  $v_U$  および  $\beta_U$ : 上向き通過パラメーターでそれぞれ 675 および 0.36。なお,  $v_U$  および  $\beta_U$  は, シドニーでの 5 年間 (1965-1969) のデータに基づくものであり, 場所が異なれば値も異なることに注意が必要である。さらに, この手法では風の成因が均質であることが必要であり, 希に発生する大型台風などを考慮することは難しい。

さらに, 日本における強風の成因としては, 台風, 季節風, 温帯低気圧などが考えられるが, 台風, 季節風, 低気圧・前線の 3 種類の成因別に強風の極値統計解析を行った研究によると, 成因に分けずに極値統計解析を行ったものよりも極値分布への適合度が改善され, 精度の高い再現期待値が得られるとしている。

#### 4. 地形因子解析による基本風速の設定

風速の観測値がない地点の再現期待風速を求める場合には, 既往の資料のある多数の観測地点の資料を基に, 風速に影響する因子 (地形因子) と風速の関係を求めておき, 対象地点の因子の値から必要な風速を求める地形因子解析法が用いられることがある。

当初は, 図式相関解析法という方法が用いられ, 高度, 起伏度, 陸度, 海岸度, 開放度, 走向, 適用地域区分の因子が用いられ, あらかじめ作っておいた因子毎の経験曲線から対象地点の地形因子パラメーターを当てはめ, 風速推定値を求めた。ただし, この方法は経験曲線作図の際の曲線の引き方に客観性を欠くことと大量のデータ処理に適さない問題がある。



これに代わる手法として多重回帰式による方法が現在では一般的である。これは, 風速の再現期待値  $V$  がその地点の地形因子  $x_1, x_2, \dots, x_N$  の多変数線形回帰式

$$V = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_N x_N \quad (10)$$

で表されるとする。重回帰係数  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$  は, 解析しようとする地域にある観測地点での風速と地形因子の値から求めておく。この方法では, 多くの地形因子を考慮することが可能であり, 最近での適用例においては, 先にあげたものの他に, 経度・緯度, 海岸からの距離, 傾斜, 曲率, 収れんとその方向, さらに因子によっては着目地点を中心とする円半径の大きさを何種類かに変化させるなどしてかなり多くの因子を考慮している。ただし, 最終的には再現風速と地形因子間の単相関係数の大きなもの, および地形因子相互間の相関係数の小さなものを選び最適の地形因子を選択する必要がある。また, この方法では先に述べた地域区分は数量化が困難であるため, 回帰分析は地域ごとに行う。図 4 に多重回帰式による相関解析の流れを示す。

多重回帰式による方法においては, 風の成因別 (台風, 低気圧・前線性の風, 季節風) に相関解析を行ったもの, 常時風を対象に風向毎の相関解析を行い, 風向毎のワイブルパラメーターを求めたものなどがある。なお, 風向毎に行った相関解析においては, 地形因子の他に風向を示すダミー変数を加えて相関解析を行っている。

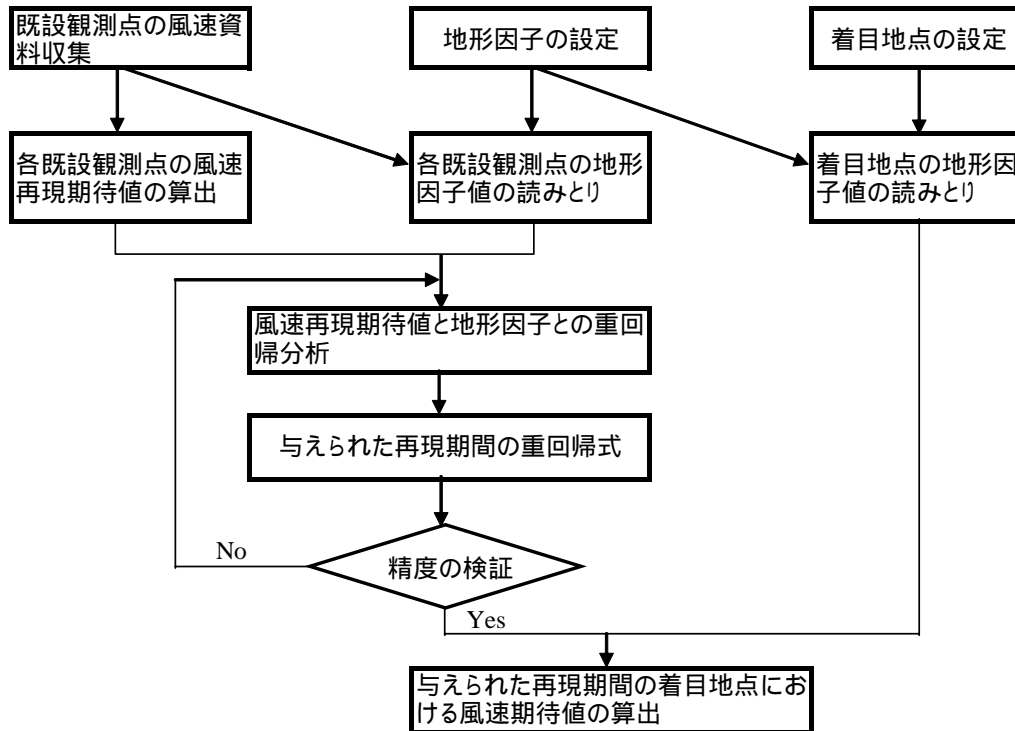


図 4 多重回帰式による相関解析の流れ

## 5 . 台風シミュレーションによる基本風速の設定

北海道や東北地方を除く日本のほとんどの地点で、年最大風速は台風によってもたらされる。しかしながら、観測記録から極値解析によって再現期待風速を求めようとすると、観測記録の長短で台風の影響度が異なり、その推定精度が問題となる。このような問題点を解決する方法として、過去に日本に上陸、接近した台風、あるいは発生した全ての台風のデータから台風特性(年発生数、中心気圧低下量、進行速度、最大旋衡風速半径など)の確率モデルを構築し、モンテカルロシミュレーションによって、例えば5千年1万年といった長期間にわたる台風の発生、進行を模擬する台風シミュレーション手法を用いることができる。シミュレーションの結果、着目地点での台風毎の風速、風向などが得られ、これを1年毎に整理すれば年最大風速が得られ、シミュレーション期間での極値解析を行うことで着目地点での再現期待風速が求められる。この方法によれば、十分に長い期間でのシミュレーションを行うことで、極値解析で問題となる確率分布形の裾部の特性が安定して再現できる利点がある。さらに、風観測データからでは統計期間などの問題で困難とされる、風向毎の再現期待値の算定も行うことができ、基本風速の風向特性も検討することができる。ただし、この方法で得られる風速は、台風の気圧場を基にしているため地表地形の影響を受けない上空風速(傾度風速)であり、これを地表風速に変換する際の精度に注意が必要である。

台風シミュレーションには、大別して、地域限定型モデル(Region Specific Model)とサイト限定型モデル(Site Specific Model)の2つの方法がある。このうち、地域限定形モデルでは、モデル台風を日本の南海上で発生させ、その後の進行、盛衰を確率的にシミュレートするものである。一方、サイト限定形モデルでは、基本風速を求めようとする地点を含む一定の地域を通過した台風統計から台風の確率モデルを作成し、対象地点での風速特性をシミュレートしようとするものである。

図 5 に、一例として、地域限定型モデルでのシミュレーション結果を示す。これは、日本南海上で過去50年間に発生した台風の統計データを用いて確率モデルを作成し、5,000年に相当する期間での北西太平洋上で台風をシミュレートしたものである。東京を対象地点とすると、1年毎に年最大風速を整理することができ、その結果を基に極値統計解析を行うことで、任意の期間の再現期待

風速を求めることができる。また、この例では、台風の強度に影響を及ぼす海面水温をパラメータとして組み込み、将来の海面水温予測データを使うことで、海面水温の上昇が再現期待風速に与える影響を調べている。

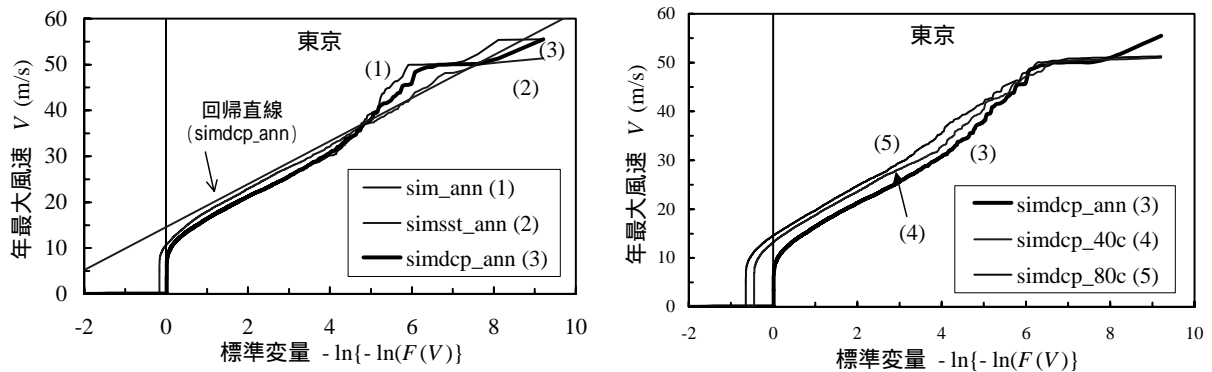


図5 地域限定型モデルによる台風シミュレーション結果の一例

## 6. 地形模型風洞試験による方法

基本風速を求める地点が平坦な地形ではなく、切り立った斜面の近傍や溪谷部などでは、風は地形の起伏の影響を大きく受け、上空とは異なる複雑な吹き方をすることが予想される。また、基本風速を求めようとする地点に風の観測データがあるとは限らない。このような場合、上空風速と地表風速との比、あるいは風速の推定されている基準地点の風速と着目地点の風速・乱れ強さの比を地形模型風洞試験によって求めることができる。

旧くは関門橋や本州四国連絡橋の基本風速を決める際に、他の方法と併用して地形模型風洞試験が行われたことがある。この際、風洞試験に用いる模型は、着目する地域の数倍以上の範囲をカバーしなければならないので、模型縮尺が通常は 1/500 ~ 1/10,000 程度とかなり小さなものとなり、測定精度があまり高くないという問題がある。

## 7. 数値流体計算による方法

石原先生？