

- 18 GISを用いた台風シミュレーション・システムによる 風向別風速の再現期待値の推定

Estimation of directional basic wind speed by GIS-based typhoon simulation system

天野貴文¹・明田 修²・鈴木 威³

Takafumi AMANO, Osamu AKETA and Takeshi SUZUKI

抄録: 本研究では、長大橋の基本風速設定のため、GIS ベースの台風シミュレーション・システムを開発し、風向別風速の再現期待値を推定した。気象庁発表の台風データから作成した台風特性を表す確率モデル、および現地風観測記録により較正した傾度風・地上風モデルを用いてモンテカルロシミュレーションを実施し、架橋地点における風向別の年最大風速の確率分布を算出した。シミュレーションの結果、風向別風速の100年再現期待値は南南西で最大となり35m/sと推定された。また、GISの機能を効果的に活用し、強風をもたらす台風の特性を明らかにするとともに、シミュレーションの途中状況や結果を視覚的に表現した。

Abstract: In this research, the basic wind speed for a long-span bridge was estimated using GIS-based typhoon simulation system. The probability distributions of the annual maximum wind speeds were computed for every 16-divided wind direction by the Monte-Carlo method. The method uses probabilistic models expressing the characteristics of the typhoons which were created from the recorded typhoons by the Japan Meteorological Agency, and it also uses the Meng's formula which estimates surface wind speed at the proposed bridge site. Various analyses were efficiently performed making the best use of the functions of GIS. As a result, the maximum wind speed with a return period of 100 years was estimated to be 35m/s (south-southwest direction). Furthermore, the characteristics of the typhoons which caused extremely strong wind speed at the site were considered.

キーワード: GIS, 台風シミュレーション, 基本風速, 年最大風速, モンテカルロ法

Keywords: GIS, typhoon simulation, basic wind speed, annual maximum wind speed, Monte-Carlo method

1. はじめに

長大橋の耐風設計においては、現地風特性を考慮して設定した基本風速（地上10m位置の10分間平均風速で定義）を用いることが多い。この基本風速は、架橋地点近隣の管区気象台の年最大風速記録に基づいて推定する方法や地形因子法などを用いて設定されるが、過去の強風データが少ないことから、全風向に対して同一の風速として設定されている。

一方、一般に現地風特性は風向によって大きく異なり、風向により応答への影響が異なる長大橋の設計においては、風向別に基本風速を設定して設計することが合理的である。

そのためには、設定した再現期間に対応する風向別

の再現期待値を算出する必要があるが、その方法の一つとして、多数の研究者により研究されている台風シミュレーション^{1) 2) 3) 4)}が挙げられる。台風シミュレーションとは、台風の物理的な性質に基づく確率モデルを作成し、台風を確率的にシミュレーションすることで、対象地点における風速を統計確率的に評価する手法の総称である。

本研究の目的は、台風シミュレーション手法を神戸市ポートアイランド沿岸部で計画されている長大橋に適用し、基本風速設定時の基礎資料となる風向別風速の再現期待値を推定することである。そこで、松井の方法⁵⁾を基に、GIS (Geographic Information System) を用いて台風シミュレーション・システムを開発し、GISによる幾何解析の援用の下、風向別風速の再現期

1 : 正会員 修(工) (株)総合技術コンサルタント 大阪支社 技術I部 開発課
(〒533-0033 大阪市東淀川区東中島3-5-9, Tel: 06-6325-2923)

2 : 正会員 工修 (株)総合技術コンサルタント 大阪支社 技術I部
(〒533-0033 大阪市東淀川区東中島3-5-9, Tel: 06-6325-2923, E-mail: o-aketa@sogo-eng.co.jp)

3 : 正会員 阪神高速道路(株) 保全施設部 保全管理グループ (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

待値を推定する。さらに、GIS の機能を効果的に活用して架橋地点の風速に影響を及ぼす台風特性を捉え、シミュレーションの途中状況や結果を視覚的に表現した。

なお、本研究では瞬間的で局所的な台風時の突風については対象としていない。

2. 風向別風速の再現期待値の検討フロー

風向別風速の再現期待値の検討フローは図-1 に示すとおりであり、1) 台風のモデル化、2) 既往台風の傾度風・地上風の計算と較正、3) 台風シミュレーション、の大きく3フェーズに分かれている。

図-1 の検討フローをベースとして台風シミュレーション・システムに必要な基本機能を表-1 のとおり定義し、地図表示、地図データ管理および幾何解析部分ではGISの機能を最大限に活用する方向でシステムの設計・開発をおこなった。次章の「台風のモデル化」以降の内容は、フロー中の各項目に対して開発した台風シミュレーション・システムを適用し、計算した結果を基に工学的判断を加えたものになっている。

なお、地図投影法のパラメータは世界測地系に準拠し、表-2 のとおり設定した。また、システム開発に用いたデータは表-3 に示すとおりであり、いずれも座標換算後にデータベース化を実施している。

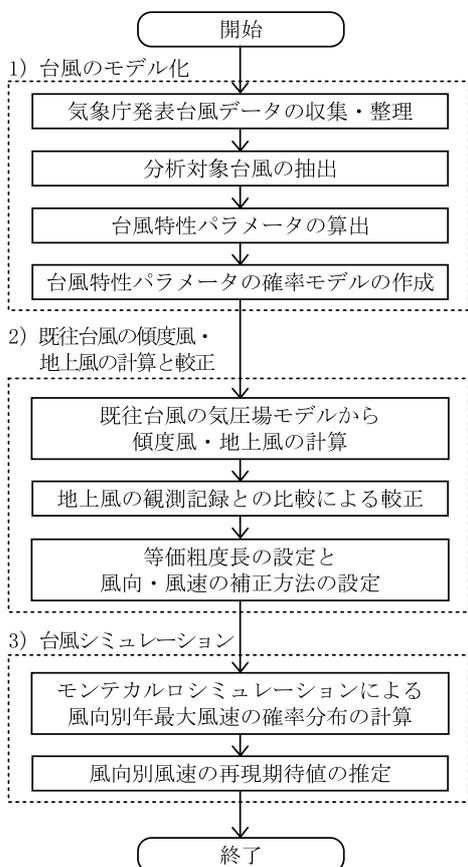


図-1 風向別風速の再現期待値の検討フロー

表-1 システムの基本機能

分類	機能	概要
地図操作	表示範囲設定	地図表示範囲の設定
	地図拡大・縮小	地図の拡大・縮小
	画面移動	地図表示範囲の移動
	経緯線表示	経緯線の表示
検索・表示	台風経路検索	指定日時の台風経路を検索・表示および条件検索(最低気圧, 最大風速, 発生・消滅時刻)
	気象官署情報検索	指定日時時点の気象官署位置, 海面気圧値, 名称の出力
	台風情報表示	台風経路の選択時に名称, 中心気圧, 最大風速を表示
分析・解析	観測位置設定	風向別最大風速を計算する観測位置を設定
	台風特性パラメータの計算	指定台風ごとに観測位置に最接近したときの位置を基準に台風特性パラメータを計算
	中心気圧低下量・最大旋衡風速半径の計算	台風中心から指定範囲内の気象官署の海面気圧値と距離を取得し, Schloemer式に当てはめて収束計算
	理論分布推定	確率紙上で理論分布推定
	台風モデル生成	確率分布にしたがった乱数を発生させて台風特性パラメータを確定し台風モデルを作成
	風向・風速計算	観測位置における傾度風・地上風(風速・風向)を計算
	較正(等価粗度長・風向偏位量調節)	観測位置の等価粗度長および風向偏位量を設定し, 残差の標準偏差を計算
	台風シミュレーション	台風モデルを連続して生成し, 風向・風速を算出
	風向・風速評価	風向・風速計算値に風速変動・風向不確定性を適用し, 風向・風速を評価
その他	風向別最大風速計算	台風ごとの風向別風速の確率分布を計算し, 最大風速の期待値を算出
	再現期待値計算	風向別に再現期待値および再現期間を計算
	計算結果出力	計算結果の表形式での出力とCSVファイル書き出し
	作業記録保存	作業記録の保存と解析途中からの再開

表-2 地図投影パラメータ

投影法	ランベルト正角円錐図法
中央経線	東経 135° 0' 0"
標準緯線	北緯 23° 0' 0" および北緯 50° 0' 0" (2 標準緯線)
楕円体	GRS80
測地系	ITRF94

表-3 使用データ一覧

項目/出典	内容
台風経路データ /気象庁	1951年～2004年の台風経路位置情報
海面気圧値 /気象庁	1961年～2004年の全国の気象官署の海面気圧値
気象官署履歴 /気象庁	2004年までの全国の気象官署の移動履歴
世界デジタル地図 /米国国防地図庁	100万分の1のデジタル世界地図
現地観測風速・風向 /阪神高速道路(株)	ポートアイランドの南西端設置の風観測鉄塔で観測した10分間平均風速・風向

3. 台風のモデル化

(1) 既往台風データの収集と分析対象台風の抽出

気象庁が発表した1951年から2004年までの54年間に発生した全台風(1445台風)から架橋地点に接近する台風を抽出し、台風シミュレーションに用いる台風特性パラメータ(台風気圧場の確率モデル)を決定する。抽出条件は後述する架橋地点に設置されている風観測鉄塔(北緯34°39'25.9", 東経135°12'15.4")を中心に半径500kmの範囲を通過し、かつその範囲内で中心気圧が980hPa以下となる台風とし、オーバーレイ分析により抽出した。この結果、図-2に示す156台風が対象となった。

(2) 台風特性パラメータの算出

架橋地点へ接近する台風の特性を示すパラメータとして、年平均発生数 \bar{m} 、最接近時の台風中心までの距離(最接近距離) R_{min} と方位(中心方向角) θ_{min} 、移動速度 C 、移動方向 θ_T 、中心気圧低下量 D_p 、最大旋衡風速半径 R_M 、の7パラメータを各種確率分布に当てはめた。

具体的な当てはめには、各確率分布を示す確率紙を作成する方法を用いた。確率紙にHazenの方法でプロットした統計データの回帰直線を最小二乗法で求め、二乗平均平方根誤差(RMSE: Root Mean Square Error)

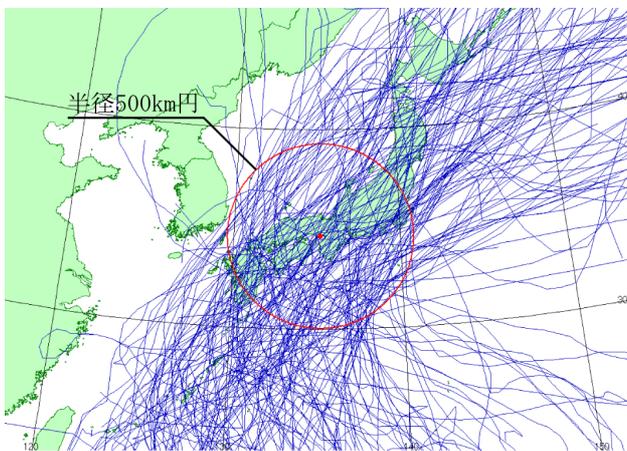


図-2 分析対象台風の経路図(156台風)

を計算する。このRMSEが最小となる確率分布を当てはめた。

a) 年発生数

台風の年平均発生数(\bar{m})は $156/54=2.89$ (個)となる。年発生数(m)は0および0に近い数値のみをとる資料の離散的確率分布の表現によく用いられるポアソン分布に適合させる⁶⁾。

b) 中心方向角

まず、計算に用いる座標系を図-3のとおり、東を0°として反時計回りを正とする座標系を定義する。本座標系で西は反時計回りで180°、時計回りで-180°と計算される。

台風の最接近点は架橋地点から台風経路に対する垂線の足をGISの幾何解析で求めた。図-4は架橋地点に最接近した時の台風中心方向角の頻度分布である。この頻度分布より、-180°から-112.5°および67.5°から180°で最接近するグループ1(図-5: 68台風)と-112.5°から67.5°で最接近するグループ2(図-6: 88台風)に分けて確率分布への当てはめを検討する。

中心方向角の確率分布への当てはめの結果、グループ1は対数正規分布、グループ2は正規分布によく当てはまった。

c) 最接近距離

最接近距離は両グループとも一様分布によく当てはまった。

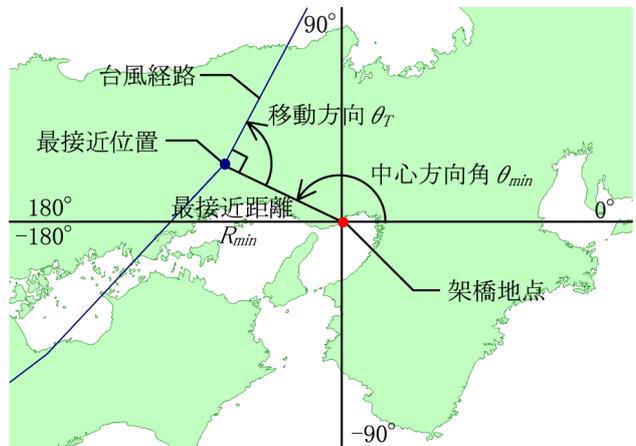


図-3 座標系の定義

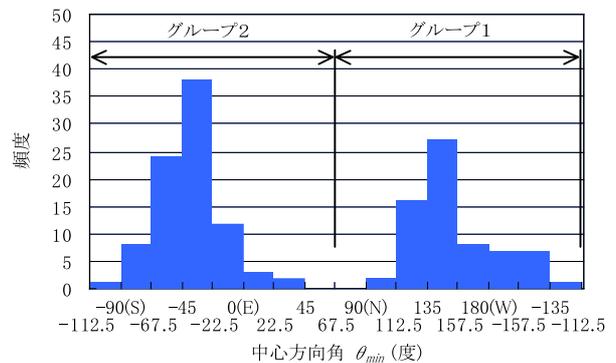


図-4 中心方向角の頻度分布

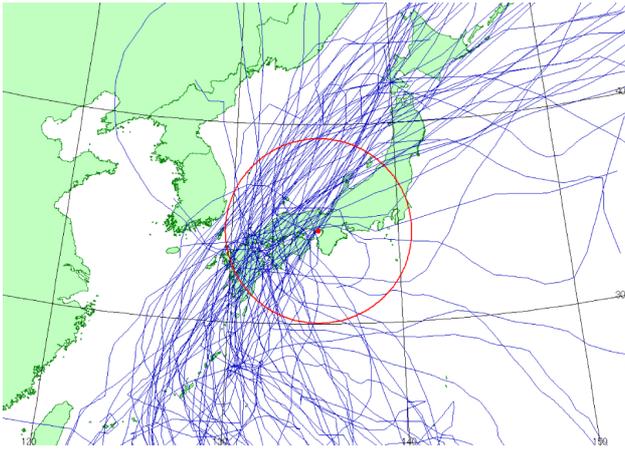


図-5 グループ1の台風経路 (68 台風)

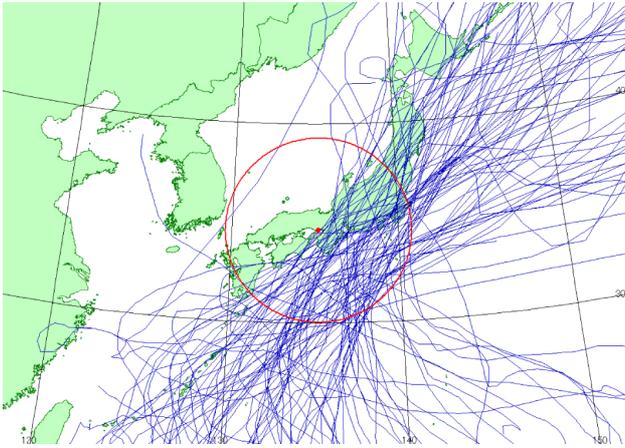


図-6 グループ2の台風経路 (88 台風)

d) 移動速度

台風経路データには3または6時間ごとの台風中心点が収録されているが、これを1時間毎に同定できるように補間する。台風の解析位置間の距離から移動速度を算出し、中心点前後の経路の平均移動速度から解析位置における移動速度を求めた後、速度の線形関係から1時間ごとの補間位置と移動速度を設定した。移動速度の確率分布への当てはめの結果、グループ1がワイブル分布、グループ2は正規分布がよく当てはまった。

e) 移動方向

移動方向は図-3に示すように、台風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である。計算基準は台風の最接近位置であるため、移動方向は対象地点から台風経路に対する垂線の直角方向となり、グループ1で90°、グループ2で270°の定数となる。

f) 中心気圧低下量

気圧場（気圧分布）の計算式には、気象官署における毎正時観測結果との適合性が高く、解析値に不自然な値が得られた場合が最も少ないとされる Schloemer の提案式を用いる²⁾。

$$p(r) = p_c + D_p \cdot e^{-\frac{R_M}{r}} \quad (3.1)$$

ここに、 $p(r)$ ：気象官署の海面気圧 (hPa)

p_c ：中心気圧 (hPa)

D_p ：中心気圧低下量 (hPa)

R_M ：最大旋衡風速半径 (km)

r ：台風中心と気象官署の距離 (km)

なお、中心気圧低下量は台風の中心気圧と周囲の気圧との差である。また、最大旋衡風速半径とは旋衡風速（旋衡風：気圧傾度力と旋回による遠心力が釣り合った状態で吹く仮想的な風）が最大となる半径をいう。

3(1)で抽出した156台風について、図-7に示すように、架橋地点に最接近したときの台風中心から半径500km内の気象官署をオーバーレイ分析で抽出し、その2点間の距離と海面気圧とを Schloemer の提案式に当てはめ、中心気圧、中心気圧低下量および最大旋衡風速半径の3変数を、修正 Marquardt 法⁷⁾により求めた。図-8は T6118（第二室戸台風）の気圧場を当てはめた例である。

上記手法で算出した中心気圧低下量を確率分布に当てはめた結果、グループ1、グループ2とも正規分布が最もよく当てはまった。

g) 最大旋衡風速半径

前項の中心気圧低下量と同様の手法で算出した最大旋衡風速半径を確率分布に当てはめた結果、グループ1が対数正規分布、グループ2がワイブル分布によく当てはまった。

h) まとめ

台風特性パラメータの確率分布への当てはめの結果

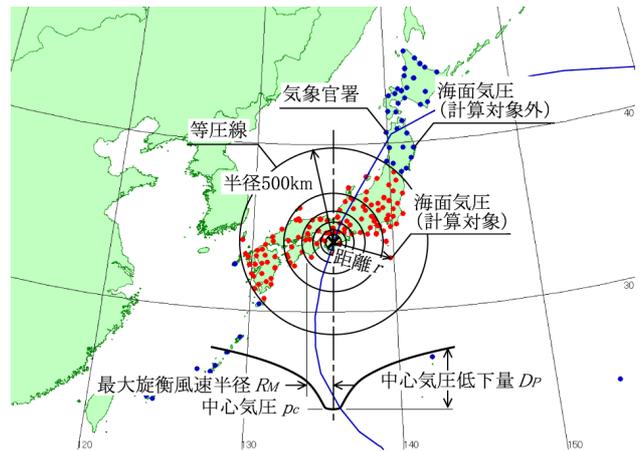


図-7 海面気圧の取得と気圧場の計算

台風番号: T6118 計算時刻: 1961年09月16日 12:00 $p_c=944.98(\text{hPa})$, $D_p=60.28(\text{hPa})$, $R_M=106.15(\text{km})$

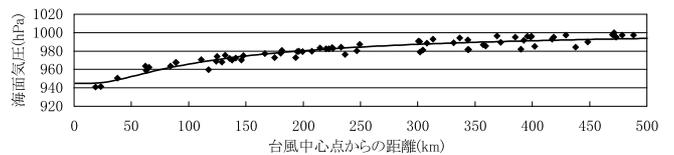


図-8 Schloemer 式への当てはめ例 (T6118, 第二室戸台風)

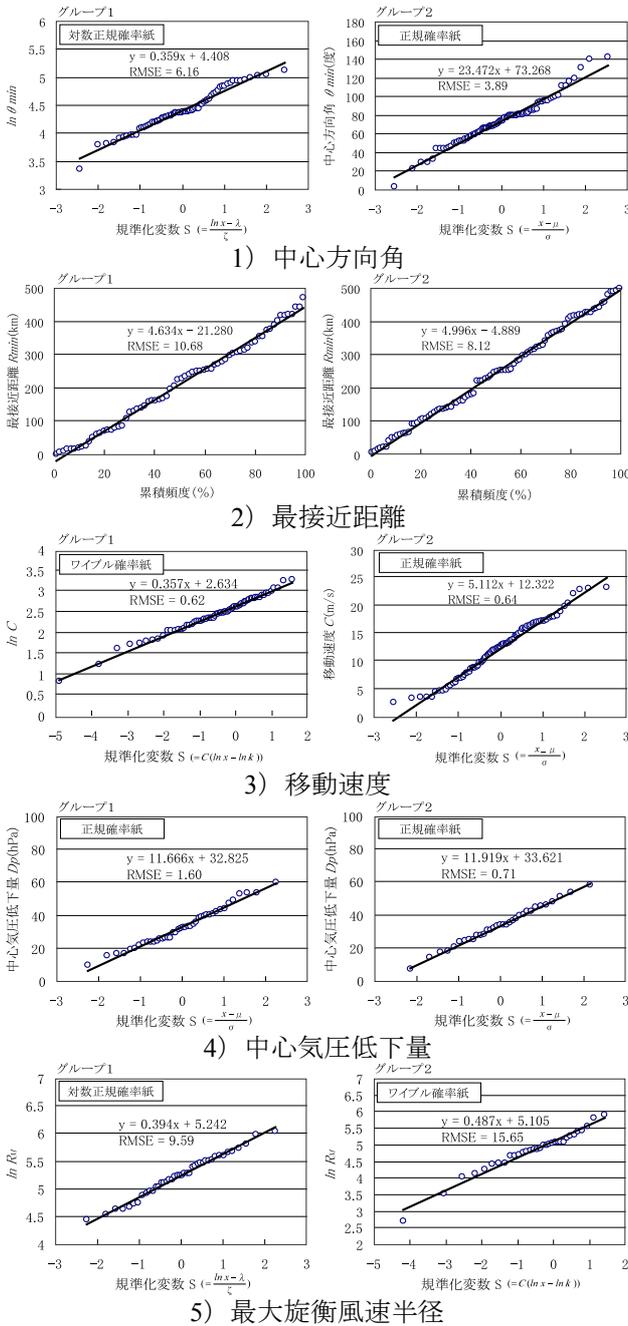


図-9 確率分布への当てはめ

は図-9 に示すとおりである。ここで $N(0,1)$ の標準正規確率変数を用いると、パラメータは表-4 に示すとおりとなった。

(3) 台風特性パラメータ間の相関分析

架橋地点で計算した台風特性パラメータの内、移動方向角、中心気圧低下量、最大旋衡風速半径、移動速度、の4パラメータについて相関分析をおこなった。台風の経路により全台風、グループ1、グループ2、の3ケースに分類して分析した結果、表-5 のとおりとなった。

表-5 が示すように、台風パラメータ間の相関はほとんど見られないため、以下の台風シミュレーションでは、各パラメータは独立として取り扱った。

表-4 設定した台風特性パラメータ

台風特性パラメータ	分布形	設定値
年平均発生数 \bar{m}_1	POI	1.26
中心方向角 θ_{min1}	LOG	$82.11 \times e^{0.359N(0,1)} + 67.5$
最接近距離 R_{min1}	UNI	$0.15 (0 \leq R_{min} \leq 100)$ $0.10 (100 < R_{min} \leq 450)$
移動速度 C_1	WEI	$C = 13.93, k = 2.80$
移動方向 θ_{T1}	CON	90°
中心気圧低下量 D_{P1}	NOR	$N(32.83, 11.67^2)$
最大旋衡風速半径 R_{M1}	LOG	$189.05 \times e^{0.394N(0,1)}$
年平均発生数 \bar{m}_2	POI	1.63
中心方向角 θ_{min2}	NOR	$N(73.27, 23.47^2) - 112.5$
最接近距離 R_{min2}	UNI	$0.125 (0 \leq R_{min} \leq 150)$ $0.0893 (150 < R_{min} \leq 500)$
移動速度 C_2	NOR	$N(12.32, 5.11^2)$
移動方向 θ_{T2}	CON	270°
中心気圧低下量 D_{P2}	NOR	$N(33.62, 11.92^2)$
最大旋衡風速半径 R_{M2}	WEI	$C = 164.79, k = 2.05$

POI:ポアソン分布, NOR:正規分布, LOG:対数正規分布
WEI:ワイブル分布, UNI:一様分布, CON:定数

表-5 台風特性パラメータ間の相関マトリクス

台風特性パラメータ	θ_T	D_p	R_M	C
移動方向角 θ_T	1.000	0.056	-0.135	-0.144
中心気圧低下量 D_p	0.056	1.000	-0.193	0.329
最大旋衡風速半径 R_M	-0.135	-0.193	1.000	0.032
移動速度 C	-0.144	0.329	0.032	1.000
移動方向角 θ_T	1.000	0.080	-0.208	-0.439
中心気圧低下量 D_p	0.080	1.000	-0.299	0.329
最大旋衡風速半径 R_M	-0.208	-0.299	1.000	-0.151
移動速度 C	-0.439	0.329	-0.151	1.000
移動方向角 θ_T	1.000	0.053	-0.388	0.069
中心気圧低下量 D_p	0.053	1.000	-0.058	0.336
最大旋衡風速半径 R_M	-0.388	-0.058	1.000	0.218
移動速度 C	0.069	0.336	0.218	1.000

4. 傾度風・地上風の計算と観測記録との較正

(1) 傾度風・地上風モデルの作成

傾度風（気圧の等高線に沿って吹く理論上の水平風）・地上風のモデルには松井の方法に倣い、Mengらのモデル⁸⁾を用いる。

(2) 架橋地点での台風時風観測結果と周辺環境

本研究の対象としているポートアイランド（架橋地点）では3（1）で触れたように風観測鉄塔が設置され、約6年分の風速・風向データが収集されている（図-10）。この風観測データを整理の後にデータベース化し、次項の較正に用いた。

次に架橋地点の周辺環境について述べる。架橋地点はポートアイランドの南西側に位置し、南側は大阪湾に面し神戸空港を除きすべて海上となる。西から北にかけては、神戸港と住宅地があり、その背後に山地の地形となる。北から東にかけてはポートアイランドの中高

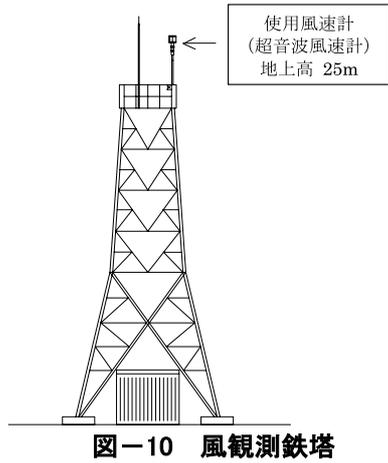


図-10 風観測鉄塔



図-11 架橋地点（風観測鉄塔）周辺図

層の建物群～神戸港～商業地となっている。したがって、架橋地点の南側の地表面粗度は小さく、北西から北東の順に粗度は大きくなると考えられる。また、架橋地点周辺の比較的大きな地形の影響として、架橋地点の北西～北東側には 500～1000m 級の六甲山地があり、北風は山越えの風となる。西風、東風は六甲山地が障害物となって風の回り込みや収束などによる風向の変化も生じると考えられる。(図-11)

(3) 現地観測記録との較正

Meng らのモデルを用いた地上風の計算結果は、地表面粗度は一様で、かつ周辺地形を平面地形として扱っている。そこで、近似的な対処として対象台風について地上風速・風向を計算し、同一時刻の現地風観測結果と比較することで 1) 風向別風向偏差を算出して風向の系統的誤差を補正, 2) 大規模地形の影響なども含めた等価粗度長を風向別に設定, の 2 点の較正を実施する。較正に用いる台風は抽出した 156 台風の内、ポートアイランドの風観測記録が得られている 1998 年 11 月 19 日以降に発生した 23 台風とした(図-12)。

前項で述べた周辺の状況から、表-6 を参考に等価粗度長の初期値を設定し、地上高さ 25m 位置での計算結果と観測値を比較し、風向偏差を風向偏位量として補正しつつ、風速比が 1 に近づくよう風向別粗度長を

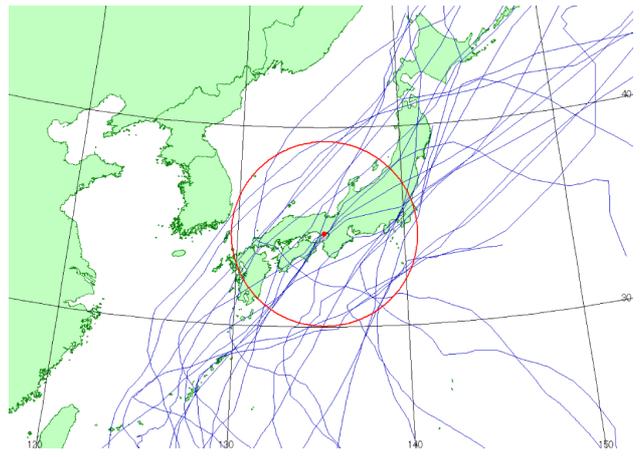
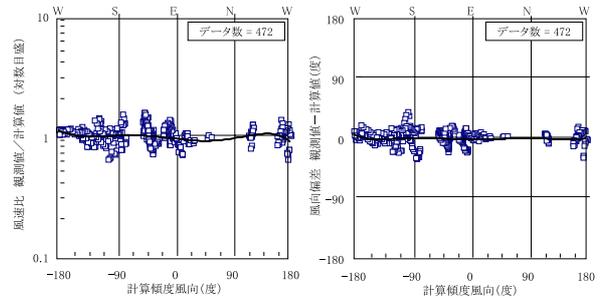


図-12 較正対象台風の経路 (23 台風)

表-6 地表面粗度区分と粗度長

粗度区分	周辺地域の地表面の状況	べき指数 α	粗度長 z_0 (m)
I	海上のようなほとんど障害物のない平坦地	0.10	0.0002
II	田園地帯や草原のような、農作物程度の障害物がある平坦地、樹木・低層建築物などが散在している平坦地	0.15	0.01
III	樹木・低層建築物が密集する地域、あるいは中層建築物(4～9階)が散在している地域	0.20	0.1
IV	中層建築物(4～9階)が主となる市街地	0.27	1.0
V	高層建築物(10階以上)が密集する市街地	0.35	5.8

※建築物荷重指針・同解説⁹⁾に追加



(a) 風速比 (b) 風向偏差

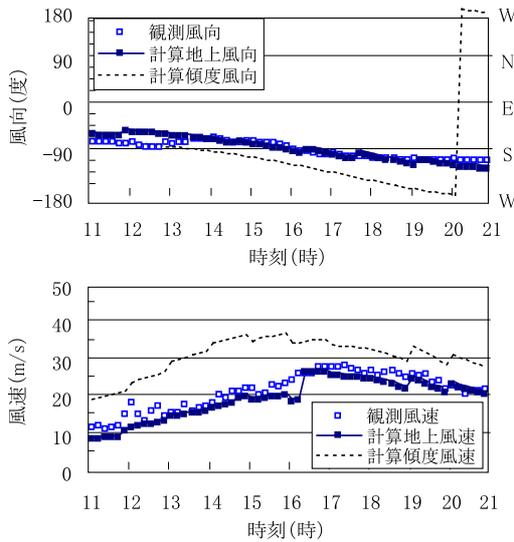
図-13 計算値と観測値の比較

最適化した。なお、表-6 の粗度長の値は松井の方法に倣い、建築物荷重指針・同解説⁹⁾を参考に算出した。最終的に、計算値と観測値は図-13 のように収束し、等価粗度長と風向偏位量は表-7 に示す値となった。

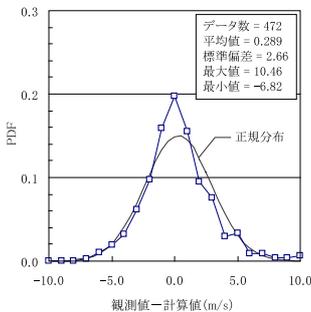
実測値で較正した Meng らのモデルによる計算値と観測値について、台風時の風向・風速の 10 分ごとの時間変化は T0418 で図-14 のようになった。また、最終的に較正で用いられた 11 台風について、計算値と実測値の残差の頻度分布は図-15 に示すように正規分布に近い分布となった。つまり、本節で較正した Meng

表一七 等価粗度長と風向偏位量の設定値

風向	等価粗度長 z_0 (m)	風向偏位量 (度)	風向	等価粗度長 z_0 (m)	風向偏位量 (度)
N	0.5	0.00	S	0.1	-0.71
NNE	0.5	0.00	SSW	0.05	5.24
NE	0.5	17.71	SW	0.0001	22.85
ENE	0.5	27.68	WSW	0.0001	35.85
E	0.1	19.67	W	0.0001	47.22
ESE	0.1	15.49	WNW	0.01	45.82
SE	0.5	41.10	NW	0.01	0.00
SSE	0.3	-13.29	NNW	0.01	-20.40



図一四 T0418 の風向・風速の時間変化



図一五 計算値と観測値の風速予測残差の分布

らのモデルは、実現象を標準偏差 2.66m/s で説明している。

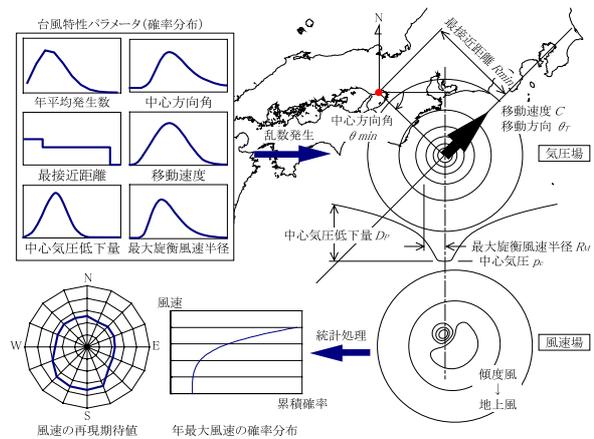
(4) 風速変動モデルの作成

台風時の気圧場から推定した風速に比べ、実測された風速 (10 分間平均風速) は大きく変動している。併せて、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とされ、米国の例では約 1 時間程度とされている¹⁰⁾。そこで、最終的に較正に用いた 11 台風について、実際の 10 分間平均風速の値は、前節で得た標準偏差 2.66m/s を 10 分間平均風速の変動幅として正規分布を与えることで平均化時間の違いによる風速の変動幅を考慮して、台風時における最大値の確率分布を求める³⁾。

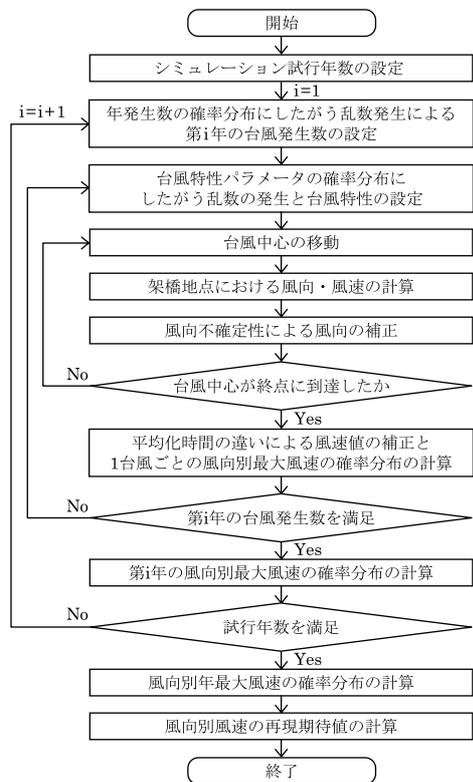
5. 風向別年最大風速の確率分布の計算

(1) 台風シミュレーションの概要

台風特性を表すパラメータの確率モデルを用い、確率分布にしたがう乱数を発生させることにより多くの台風を生成して、気圧場、風速場を計算する。生成した個々の台風をそれぞれの経路上で逐次移動させ、架橋地点の風向・風速を算出し、台風ごとに風向別最大風速を求め、最終的に風向別年最大風速の確率分布を計算する。台風シミュレーション手法の概要は図一16、台風シミュレーションの具体的方法は図一17 のとおりである。台風特性パラメータから年最大風速の確率分布を解析的に表すことは困難であることから、GIS 上で台風モデルを逐次移動させて風向・風速を計算する。



図一六 台風シミュレーション手法の概要



図一七 台風シミュレーションのフロー図

(2) 風向別年最大風速の計算

10 分間平均風速の計算値を u_j とすると、10 分間平均風速の変動範囲は次式で表される⁵⁾。

$$F_j(u) = N(u_j, \sigma_{u_j}^2) \quad (5.1)$$

ここに、 j : 時刻 t を示す指標

$N(u_j, \sigma_{u_j})$: 平均 u_j , 標準偏差 σ_{u_j} の正規分布したがって、一つの台風時の風向区画 k ($=1\sim 16$) の最大風速の確率分布は次のように表される⁵⁾。

$$F_k(u) = \prod_j F_j(u)^{W_k(\theta_j)} \quad (5.2)$$

ここに、 $W_k(\theta_j)$: θ_j が風向区画 k に属する場合 1, その他は 0

風向不確定性とは風向に関する「わからなさ」を示し、モデル化誤差や標本化誤差などが含まれる¹¹⁾。シミュレーション上では、計算した風向区画の左右の区画に対して計算区画と同じ計算風速が観測されたものとして扱っている(図-18)。

最後に、風向区画 k における年最大風速 A_k の確率分

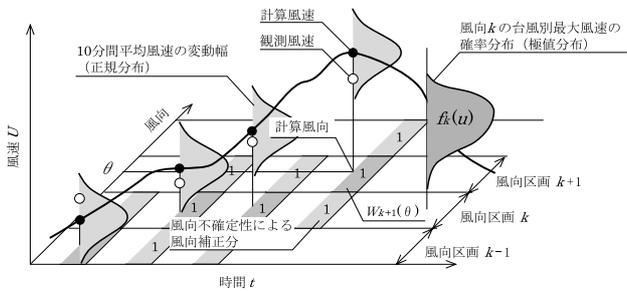


図-18 風速変動・風向不確定性の概念

布は下式で計算する⁵⁾。

$$F_{A_k}(u) \cong \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \prod_{l=1}^{m_i} F_k(u) \right\} \quad (5.3)$$

ここに、 N_T : シミュレーション年数

$F_k(u)$: 第 i 年の第 l 番目の台風の最大風速の確率分布

m_i : 第 i 年の台風発生数

図-17 のフローに沿って台風シミュレーションを実施する(図-19)。計算高さ地上 10m, シミュレーション試行年数は 10000 年, 風速変動値 2.66m/s, 風向不確定性を 1 区画考慮した。シミュレーションの結果、風向別年最大風速の確率分布を極値 I 型 (Gumbel) 確率紙上に表すと図-20 のようになった。極値 I 型で再現期間 100 年は規準化変数 S が 4.6 の位置にあたる。

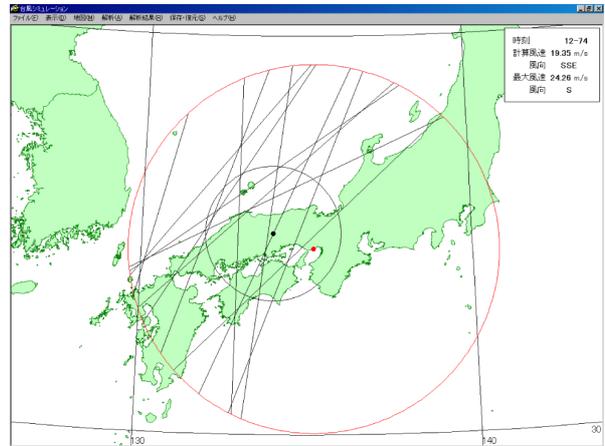


図-19 シミュレーションの様子 (システム画面)

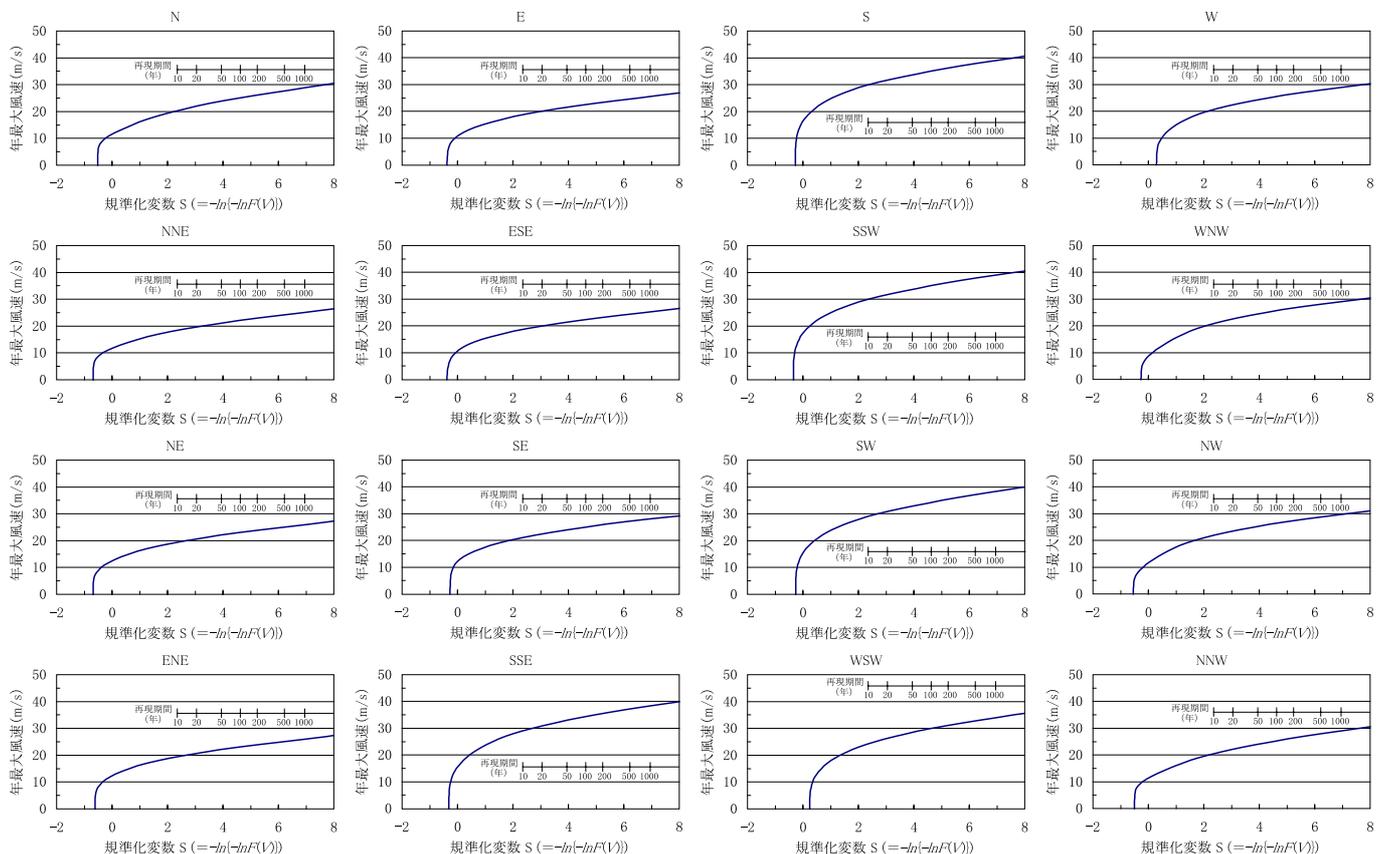


図-20 架橋地点での 16 風向別年最大風速の確率分布

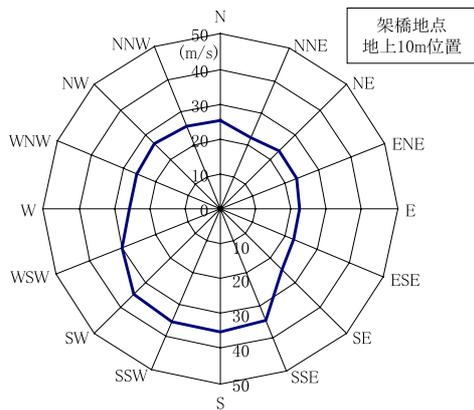


図-21 風向別風速の100年再現期待値

これを全風向で読み取り、風配図として表したものが図-21である。最大風速は南南西で35.0m/s、全体的に南よりの風が強い傾向が現れている。

(3) 卓越風向の強風をもたらす台風

台風シミュレーションで最大風速を計算した南南西の風に影響する台風特性パラメータを検討する。10000年のシミュレーションの結果、28735台風が発生し、この中から年最大風速の確率分布における最大レベルの台風を抽出して強風をもたらす要因を考察する。ここでは風速上位の20台風(概ね最大風速が38m/s以上)の台風特性パラメータを表-8、その経路図を図-22に示す。図-23は上位100台風の経路図であり、経路のばらつきは次第に大きくなる。

以上より、南南西の強風をもたらす台風の特徴として以下の知見を得た。

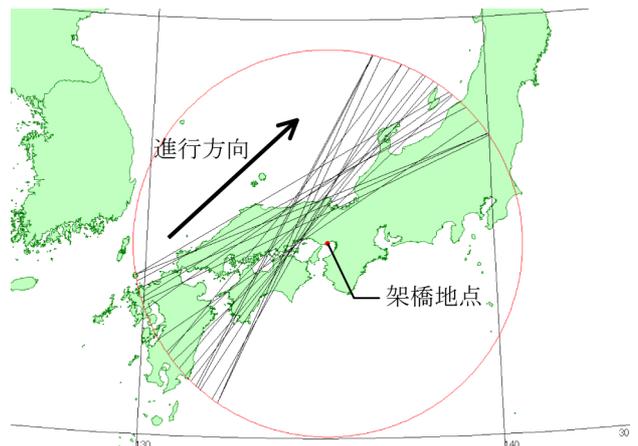


図-22 試行年数10000年の風速上位20台風の経路

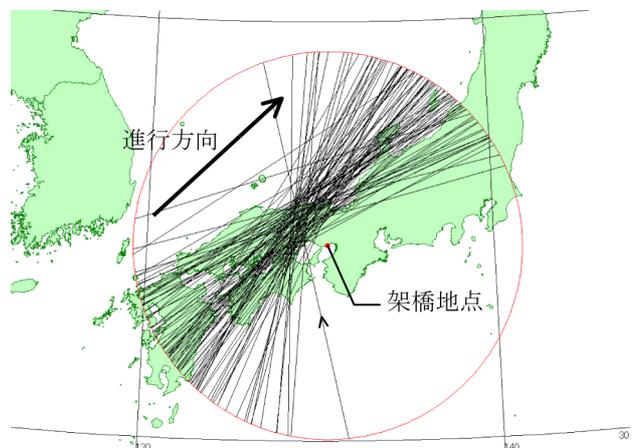


図-23 試行年数10000年の風速上位100台風の経路

表-8 試行年数10000年の風速上位20台風の台風特性パラメータ

順位	台風番号※1	風速 (m/s)	中心方向角 θ_{min} (度)	最接近距離 R_{min} (km)	移動速度 C (m/s)	推定中心気圧 p_c (hPa)※2	中心気圧低下量 D_p (hPa)	最大旋衡風速半径 R_M (km)
1	G1-4136-1	43.66	115.86	71.78	20.42	948.40	64.60	95.69
2	G1-4532-1	42.07	133.69	55.16	16.40	951.91	61.09	73.43
3	G1-7263-2	39.72	124.51	42.94	10.88	950.03	62.97	81.45
4	G1-8248-1	39.51	147.15	70.25	18.86	953.26	59.74	125.24
5	G1-9487-2	39.11	111.85	110.04	20.31	953.05	59.95	178.89
6	G1-5251-2	39.06	120.34	180.55	14.26	938.92	74.08	184.05
7	G1-4839-3	38.93	152.34	121.94	5.85	936.25	76.75	105.50
8	G1-5385-2	38.75	134.63	92.05	17.86	951.33	61.67	161.08
9	G1-9859-3	38.74	114.12	93.13	7.27	948.20	64.80	122.72
10	G1-3846-1	38.73	142.55	63.60	28.41	970.07	42.93	118.18
11	G1-2643-1	38.66	152.10	126.62	18.42	942.46	70.54	226.82
12	G1-2895-1	38.54	154.73	80.95	12.60	947.68	65.32	140.39
13	G1-6976-4	38.51	156.11	92.96	16.94	953.57	59.43	131.40
14	G1-7943-1	38.42	140.04	61.63	24.56	966.40	46.60	110.14
15	G1-1395-1	38.32	121.78	132.57	18.16	953.15	59.85	112.65
16	G1-9858-1	38.32	140.52	88.93	24.81	959.60	53.40	168.19
17	G1-9706-1	38.18	141.34	140.25	10.04	943.19	69.81	166.25
18	G1-1038-1	38.08	150.68	62.45	20.30	965.64	47.36	71.92
19	G1-2379-1	37.88	117.96	144.59	19.28	951.02	61.98	227.02
20	G1-6850-1	37.71	125.14	130.97	20.82	959.88	53.12	155.28

※1 台風番号は GX-YYYY-N で示し、X はグループ番号、Y は発生年、N は発生年内の台風番号である。

※2 標準気圧を 1013hPa と仮定した場合の値を示す。(中心気圧=1013-中心気圧低下量)

- 1) 台風最接近時の中心方向角が 110~160 度、距離が 40~180km にあり、岡山県東部から南部を通過する台風が架橋地点に強風をもたらす。
- 2) 中心気圧低下量は 40~70hPa、最大旋衡風速半径は 70~230km の範囲にあり、中心気圧が極端に低くなくても、経路により強風をもたらしている。
- 3) 移動速度が比較的大きい。地形の影響を考慮すると、偏西風などの強風帯の影響を受け、移動速度を増した台風が強風をもたらすと考えられる。

(4) 顕著台風の経路の影響

過去に大きな風速を観測した台風に着目し、台風の経路が架橋地点での最大風速に与える影響を考察する。ここでは、架橋地点から最も近い気象台である神戸海洋気象台で観測した 1961 年以降の年最大風速上位 5 台風と、ポートアイランドでの観測において、グループ 1 と 2 それぞれで最大風速を記録した 2 台風について、実経路の再現による風速計算 (図-24) とともに、最接近時に最大旋衡風速半径の位置を通過するよう台風をシフトさせた経路 (図-25) で風速を計算した。既往の台風の台風特性パラメータを変えずに経路のみシフトさせた結果、表-9 に示すとおり、幾つかの台風で 100 年再現期待値を超過する風速が計算された。

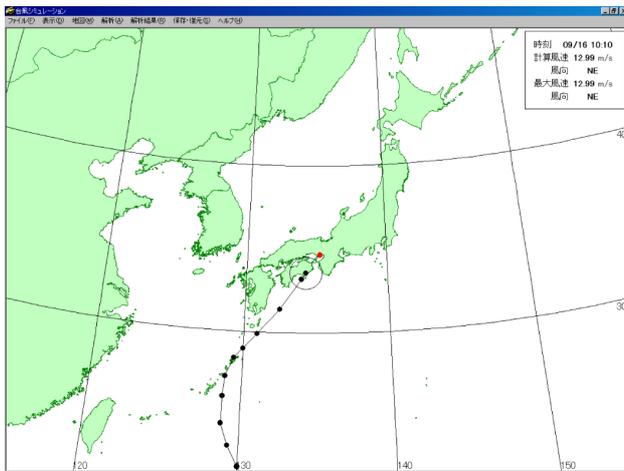


図-24 台風経路と風速の再現 (システム画面)

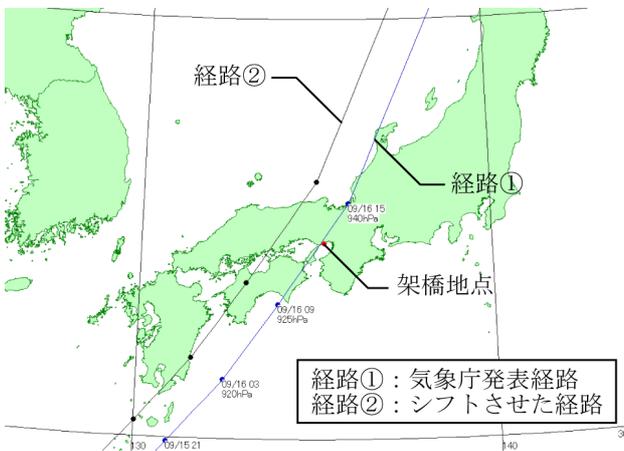


図-25 T6118 (第二室戸台風) の経路シフトの結果

表-9 経路シフト前後の最大風速期待値と相当する再現期間

台風名	経路シフト前			経路シフト後		
	風速 (m/s)	風向	再現期間 ^(a) (年)	風速 (m/s)	風向	再現期間 ^(a) (年)
T6118	28.7	SW	9	40.2	S	2265
T6207	26.4	N	219	27.6	S	5
T6420	32.2	SSW	26	32.4	S	28
T6523	35.1	SSW	105	36.3	S	201
T7220	22.6	NW	14	36.2	S	190
T0111	17.2	NNE	6	25.4	S	3
T0416	31.4	S	9	29.4	NNE	9

※) 図-20 のシミュレーション結果に基づいて算出

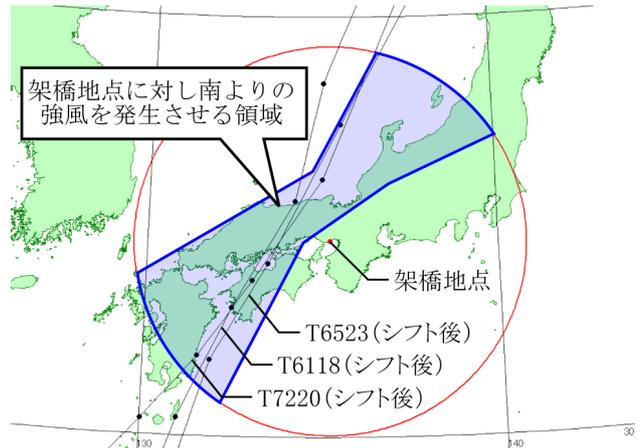


図-26 経路シフトによる 100 年再現期待値超過台風

特に T6118 (第二室戸台風) では、風速 28.7m/s から 40.2m/s に増大した。経路が最大風速に与える影響は非常に大きいと考えられる。また、南よりの風で 100 年再現期待値を超過する経路は、シミュレーションで強風をもたらした経路と一致した (図-26)。

(5) 確率分布を安全側に設定した場合の影響

台風特性パラメータの内、確率分布の裾野部が架橋地点の風速に与える影響が大きいものは表-8 より中心気圧低下量と移動速度と推定される。そこで、中心気圧低下量の影響を調べるため、確率分布として分布の上方裾野部の頻度が大きい対数正規分布に当てはめ、その結果を用いて台風シミュレーションをおこない、風向別風速の再現期待値を算出した。

a) 中心気圧低下量の対数正規分布への再当てはめ

対数正規分布に当てはめ直した中心気圧低下量は、 $N(0,1)$ を標準正規確率変数とすると以下のように表すことができる。

$$\text{グループ 1 } D_{P1} = 30.85 \times e^{0.397N(0,1)}$$

$$\text{グループ 2 } D_{P2} = 31.41 \times e^{0.435N(0,1)}$$

当てはめた確率分布は図-27 に示すとおり、分布の上方裾野部を安全側にモデル化している。

b) 風向別風速の再現期待値の再算出

中心気圧低下量の確率分布を対数正規分布に変更し、風向別年最大風速を算出した結果、100 年再現期待値の風配図は図-28、南南西での風速が上位 20 位までの

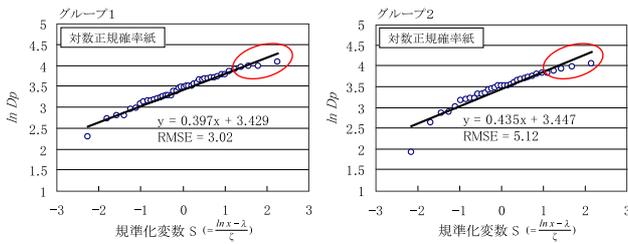


図-27 対数正規分布への当てはめ

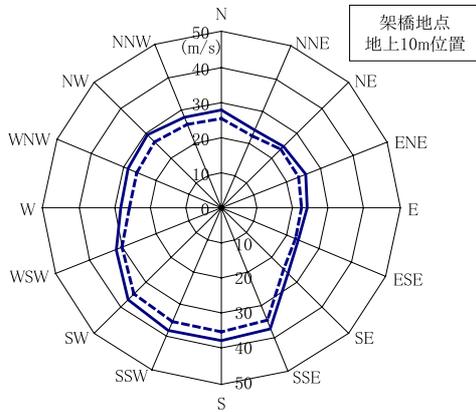


図-28 D_p を対数正規分布に当てはめた場合の風向別風速の100年再現期待値(実線, 破線はオリジナル)

台風経路は図-29のとおりとなった。以上より、確率分布の当てはめによる風速の再現期待値への影響について、以下の知見を得た。

- 1) 風速の100年再現期待値は中心気圧低下量を対数正規分布に当てはめたことで若干増加して南南西の風で37.7m/sとなった。
- 2) 南南西の最大風速の期待値の上位20台風では、風速が44.0m/s以上となる第8位までの台風の中心気圧は概ね920hPa以下となった。
- 3) 経路のばらつきが大きくなった。すなわち、架橋地点での風速に対し、通過経路よりも中心気圧低下量の影響がより大きい台風が出現していると考えられる。

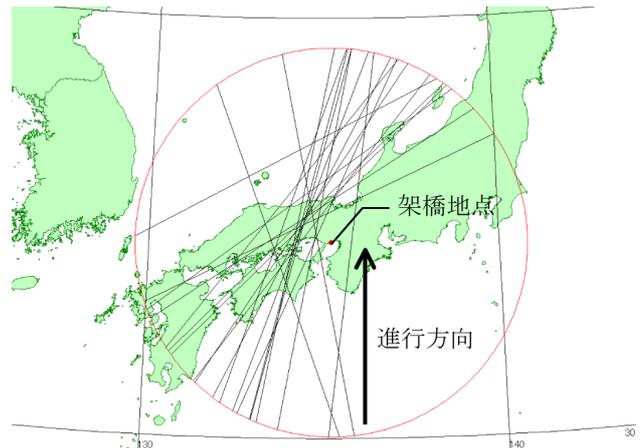


図-29 中心気圧低下量を対数正規分布に当てはめた場合の風速上位20台風の経路

(6) シミュレーション試行年数の影響

最後に、シミュレーション試行年数による風速の再現期待値への影響を確認する。試行年数を10000年および50000年としてシミュレーションを実施した結果、図-30および表-10に示すとおりとなった。

この結果より、期間100年から1000年程度の再現期待値を算出するにあたっては、試行年数は10000年で十分に安定していると考えられる。

表-10 風向別風速の100年再現期待値(単位:m/s)

風向	試行年数(年)		風向	試行年数(年)	
	10000	50000		10000	50000
N	25.07	24.97	S	34.99	35.06
NNE	22.07	22.04	SSW	35.01	35.09
NE	23.00	23.04	SW	34.20	34.30
ENE	23.03	23.06	WSW	29.89	30.09
E	22.50	22.51	W	25.51	25.56
ESE	22.33	22.24	WNW	25.66	25.67
SE	24.99	24.85	NW	26.37	26.34
SSE	34.28	34.31	NNW	25.26	25.13

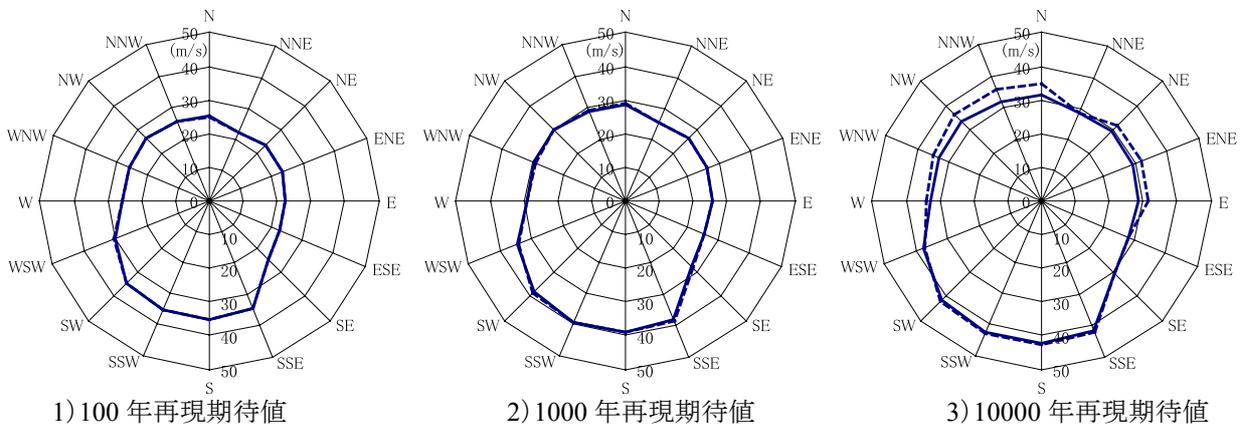


図-30 100, 1000, 10000年再現期待値の風配図
(地上10m位置, 試行年数—実線:50000年, 破線:10000年)

6. おわりに

本研究では、松井の方法を基に GIS ベースの台風シミュレーション・システムを開発し、架橋地点における風向別風速の再現期待値を推定した。その結果、風速の 100 年再現期待値は南南西の風で 35.0m/s となり、台風特性パラメータのうち中心気圧低下量の確率分布形状をより安全側に設定した場合は 37.7m/s となった。架橋地点に対して強風をもたらす要因は、経路の影響が大きいことを既往台風の経路シフトにより示した。また、シミュレーション試行年数は 100 年再現期間を求める場合においては、10000 年の試行で十分であることを示した。さらに、GIS の利用によりシミュレーションの途中状況や結果の視覚的な表現を実現し、空間解析機能を風速計算時の初期条件、境界条件の設定に用いるなど数値シミュレーションに応用することができた。

今後、本研究で推定した風速の再現期待値を踏まえ、さらに、長大橋設計への影響度や気象変動による不確定性、近隣の既設長大橋で設定された基本風速などを総合的に考慮して、本橋の基本風速が設定される。

本研究における今後の課題としては、以下の項目が挙げられる。

- 1) 数値地形モデルによる大規模地形の考慮
- 2) GIS を用いた論理的な粗度長の設定方法の確立
- 3) リアルタイム観測システムとの連携

本研究では傾度風・地上風モデルを実測値で較正し、等価粗度長と風向偏位量を与えて風速予測の精度を向上させているが、実測値がない場合は 1) と 2) の課題を解決し、較正作業なしで等価粗度長と風向偏位量を設定する必要がある。また 3) について、道路・橋梁・鉄道などの交通管理においては精度よいリアルタイム強風予測システムが切望されている。リアルタイム観測システムと連携し、短期予測にも本システムが適用できるよう、予測精度を向上させるとともに、台風シミュレーション・システムの更なる発展を目指したいと考えている。

謝辞：本研究の実施にあたり、松井正宏助教授（東京工芸大学工学部建築学科）から台風シミュレーション手法について数々の貴重なご教示を頂きました。また、松本勝教授（京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻）には長大橋の基本風速の検討に台風シミュレーションを導入することの必要性をご教示頂くと共に、検討に当たって有益なご助言を頂きました。ここに深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 光田寧, 藤井健: 台風による風災害の予測, 日本風工学会誌, 第 72 号, pp.73-91, 1997 年 7 月.
- 3) 松井正宏, 孟岩, 日比一喜: 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集, 第 506 号, pp.67-74, 1998 年 4 月.
- 4) 勝地弘, 山田均, 宮田利雄, 斎藤智久: 海面水温の影響を導入した台風シミュレーション, 日本風工学会論文集, 第 29 巻第 3 号, pp.1-17, 2004 年 7 月.
- 5) 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, 1999 年 11 月.
- 6) 藤井健, 塚本修, 光田寧: 日本本土に來襲する台風の統計的性質について, 京大防災研究所年報, 第 28 号 B-1, pp.1-11, 1985 年 4 月.
- 7) 中川徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析プログラム SALS, 東京大学出版会, 1982 年 5 月.
- 8) Meng, Y., Matsui, M. and Hibi, K.: A numerical study of the wind field in a typhoon boundary layer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.67&68, pp.437-448, 1997.
- 9) (社)日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善, 1993 年 6 月.
- 10) 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.
- 11) Matsui, M., Ishihara, T. and Hibi, K.: Directional characteristics of probability distribution of extreme wind speeds by typhoon simulation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.90, pp.1541-1553, 2002.

(2006.5.19受付)