

# 将来の気候変動を考慮した設計基準風速への影響に関する検討～大阪湾岸道路西伸部の事例研究～

中牟田和典<sup>1</sup>・高田耕庸<sup>2</sup>・金子玲衣<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (一財) 阪神高速先進技術研究所調査研究部橋梁・構造研究室

<sup>2</sup> 建設事業本部神戸建設部湾岸西伸第一建設事業所

## 要約

橋梁に用いる設計基準風速は、架設地点で風観測を実施した場合、その観測データを基に 100 年再現期待値として設定される。この風速には、観測データが少ない場合、特異な観測値に再現期待値が影響される特徴がある。一方で、IPCC 第 6 次報告書では、今後の地球温暖化の進行が確実視されている。日本においても台風の発生頻度および強度が増加される可能性が懸念されている。そこで、本研究では、気候変動が最大風速に与える影響を把握することを目的に、大阪湾岸道路西伸部を対象地点として、d4PDF の気候予測データを用いた統計的予測を実施した。さらに、過去の台風を対象に温暖化した場合の WRF による台風シミュレーションの結果を用いて、対象地点の設計基準風速にどの程度影響があるのかを検討した。

キーワード: WRF, d4PDF, 気候変動, 設計基準風速

## 1. はじめに

長大橋に採用される吊橋や斜張橋などの構造形式は、高い柔軟性と低い固有振動数を持ち、風による振動を特に受けやすい特性を有している。そのため、現地の風による影響を正確に把握し、適切な設計基準風速を設定することが求められる。橋梁の耐風設計において設計基準風速は安全性を確保する上で重要なパラメータの一つであり、架設地点で風観測を実施した場合、その観測データを基に 100 年再現期待値として設定される。この風速には、観測データが少ない場合に、特異な観測値に再現期待値が影響される特徴がある。一方で、IPCC 第 6 次報告書<sup>1)</sup>では、今後の地球温暖化の進行が確実視されている。台風の発生頻度、強度には海面水温が影響していることが明らかになっており<sup>2)</sup>、日本においても地球温暖化により台風の発生頻度および強度が増加される可能性が懸念されている。したがって、将来の気象現象の変化を理解し、その影響を評価して耐風設計などの対策を講じることが重要であり、安全な社会基盤の構築に不可欠である。

近年、地球温暖化の進行に伴い、海面水温の上昇が台風発生や発達に与える影響について、台風を対象とした多くの研究がされており、温暖化により台風が発達するメカニズムや台風の中心付近の風速が

増大することが確認されている。<sup>3)</sup>一方で、ある地点に着目すると、観測される風速は周囲の地形の影響を大きく受け、異なる傾向を示す可能性が考えられる。しかし、そのような対象地点に着目して、温暖化による台風の風速へ及ぼす影響を検討した研究は少ない。

そこで、本研究では、長大橋の建設計画が進む大阪湾岸道路西伸部を対象に、database for Policy Decision making for Future climate change(d4pdf)<sup>4)</sup>の気候予測データを用いた統計的予測を実施し、100 年再現期待値にどの程度影響があるかを確認した。

さらに、過去に対象地点に甚大な被害をもたらした 2018 年台風 21 号について温暖化が風速に及ぼす影響を Weather Research and Forecasting (WRF)および d4pdf を用いて検討した。その結果を用いて、対象地点の設計基準風速にどの程度影響があるのかを検討した。

## 2. 統計的予測

温暖化に伴う長期的な風速変動の傾向を把握するため、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」(d4PDF)を用いた統計解析を実施した。d4PDF は自然現象を対象とした数値解析

が内包している初期条件のわずかな違いが時間とともに大きく異なる結果をもたらすカオス的なふるまいを示す不確実性を定量的に評価するために作成された多数の実験結果データベースである。実験にはアンサンブル手法を用いており、初期条件やモデルのパラメータなどを少しずつ変えて多数回シミュレーションを行っている。

気象研究所が開発した全球大気数値モデル MRI-AGCM3.2 の解析結果を 5 km メッシュまで高解像度化した「全国 5kmd4PDF ダウンスケールデータ」を用いて検討を行った。

ダウンスケールには領域気候モデル NHRCM を使用し、初期値と境界値に全球大気モデルの結果を用いられている。データセットの概要を表-1 に、領域範囲を図-1 に示す。解析対象は、神戸空港（北緯 34 度 37.9 分、東経 135 度 13.4 分）の位置に対応する海上メッシュとする。

ダウンスケールデータは、20 世紀末実験（以下、過去実験）、産業革命前に比べて平均気温が 2 度上昇した条件（以下、2 度上昇実験）、4 度上昇した条件（以下、4 度上昇実験）の 3 つのシナリオがある。各々の実験で、海洋温度の初期値や海洋温度の変化パターンの条件を変更した 12 メンバーに対して 61 年分の解析を行っている。

その解析結果の 723 年分のデータから日最大地上（10 m）風速（wsmax）を抽出し、対象地点の年最大風速データを算出した。

この年最大風速を極値分布に当てはめ、100 年再現期待値を算出した。極値分布は、一般的に用いられることが多いグンベル分布を適用した。<sup>5)</sup>グンベル分布の確率密度関数と累積分布関数を図-2 に示す。確率分布の適合度を標準最小二乗基準（SLSC）を用いて評価した結果、過去実験および 2 度上昇実験は十分な適合度が得られた。一方で、4 度上昇実験は、温暖化によって極端に風速が増大したデータが原因で、閾値の目安である 0.04 を超える結果となったが、確率密度関数の分布とヒストグラムに極端な差はないと判断し、4 度上昇実験においてもグンベル分布での検討を行った。

100 年再現期待値の算出結果を図-3、表-2 に示す。温暖化実験（2 度上昇実験、4 度上昇実験）の 100 年再現期待値は過去実験よりも大きくなる傾向が示された。ただし、過去実験に対する比率は、2 度上昇実験で 1.05、4 度上昇実験で 1.04 で 2 度上昇実験の方が大きい結果となった。この要因として、年最大風速を示す個々のプロットとグンベル分布の確率密度関数を比較すると風速の大きい領域では乖離が大きく適合性が低い。またヒストグラム（図-2）を見ると、2 度上昇実験では 20 m/s 付近の度数がほかの実験と比べて小さく、25～30 m/s 付近では大きくなっている。一方で、4 度上昇実験では反対の傾向であり、この年最大風速の分布の違いによるものと考えられる。

表-1 データセットの概要

|         |                                                                                                                                                |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| データセット名 | 全国版 d4PDF ダウンスケールデータ                                                                                                                           |
| 格子間隔    | 5km                                                                                                                                            |
| データ構成   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 20 世紀末実験（過去実験）</li> <li>・ 産業革命前に比べて全球平均気温が 2℃ 上昇した条件</li> <li>・ 産業革命前に比べて全球平均気温が 4℃ 上昇した条件</li> </ul> |
| 変数名     | wsmax（日最大地上（10m）風速）                                                                                                                            |
| データ数    | 61 年×12 メンバー                                                                                                                                   |

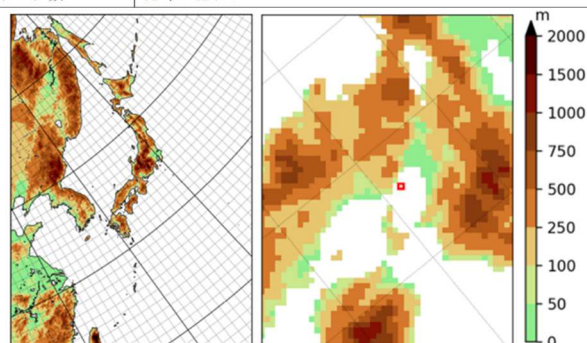
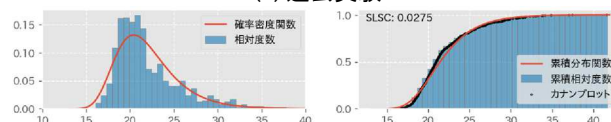


図-1 領域範囲

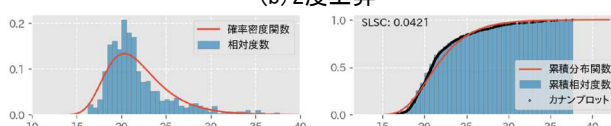
(左) 全国版d4PDFダウンスケールデータのモデル地形  
(右) 神戸空港付近の拡大図 (赤枠が抽出メッシュ)



(a) 過去実験



(b) 2度上昇



(c) 4度上昇

図-2 極値分布への当てはめ

(左) 確率密度関数, (右) 累積分布関数

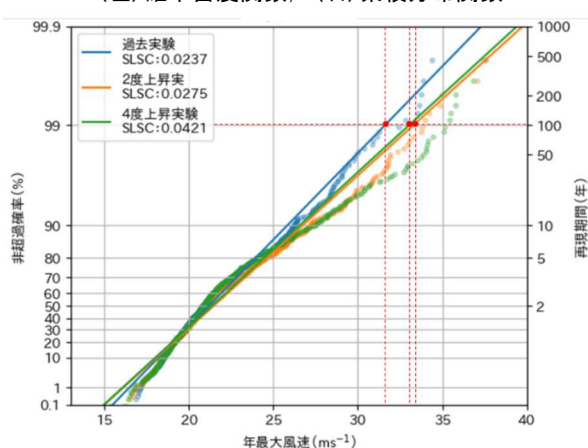


図-3 グンベル紙による各実験の比較

表-2 100年再現期待値

|        | 100年再現期待値 |      |
|--------|-----------|------|
|        | 風速(m/s)   | 風速比  |
| 過去実験   | 31.6      | 1.00 |
| 2度上昇実験 | 33.3      | 1.05 |
| 4度上昇実験 | 33.0      | 1.04 |

### 3. WRF による検討

次に、年最大風速の値に影響を与える台風事例を対象に、温暖化によって観測地点の風速にどの程度の影響を与えるのか WRF を用いて検討した。

#### 実験条件

##### a) 再現実験

検討には、WRF version 4.0を用いた。WRFはさまざまな物理過程を考慮可能な非静力学・完全圧縮型のメソ気象モデルである。計算領域は、対象台風の経路を含む西太平洋を中心に約3000 km×3000 kmとし、第1領域から第3領域までの水平格子間隔をそれぞれ15 km, 5 km, 1 kmとし、領域間で情報をやり取りしながら計算を進める双方向ネスティングを適用した(図-4)。なお、第3領域内の赤点で示された位置が本研究の対象地点である。

WRFの実験条件について表-3に示す。台風経路を再現するために、気象庁が公表する解析結果(以下、ベストトラック(図-5))に近づける措置を講じた。具体的には、第1領域の約750 hPa高度より上層の水平風のうち、波数3以下の成分にスペクトルナッジを適用することで、台風の経路に影響を与える大規模な風場を観測値に近づけた。一方で、地表付近の風速は地形の影響や温暖化を考慮した物理過程に従う形で再現した。

数値モデルの不確実性を考慮し、第1領域に対して6時間間隔で初期時刻を変更した8メンバーの初期時刻アンサンブル実験を実施した。

##### b) 擬似温暖化実験

前項の再現実験と同じ実験条件で擬似温暖化実験を行った。温暖化条件の設定については、d4PDFに基づく60 km解像度の過去実験、2度上昇、4度上昇実験の結果を用いた。これらのデータを基に、既往の文献<sup>2)</sup>に示す手法に従い、北西太平洋における東西平均の海面水温および各高度の気温の月平均値について、現在気候と温暖化実験の差分データを初期値・境界値に加える手法を採用した。

#### (2) 実験結果

##### a) 再現実験結果

台風の経路がベストトラックに沿い(図-5(a))、対象地点の台風の中心気圧および風速が観測値に近い値を示すことで、本実験の再現性が高いことを確認した。

##### b) 擬似温暖化実験結果

温暖化実験でも台風の経路がベストトラックに沿う結果が得られた(図-5(b), (c))。また、台風の上陸時の中心付近のピーク風速を比較した結果、2度上昇では2~3 m/s、4度上昇では5~6 m/s程度増加する傾向が示された(図-6)。この傾向は既往の論文とも整合しており、温暖化に伴う下層の水蒸気量の増加や上層の風の変化が、台風の核構造を強化する要因と考える。<sup>2)</sup>次に神戸空港アメダス地点における風速の比較結果を図-7に示す。図中の網掛け領域は各時刻におけるメンバー間の最大値と最小値

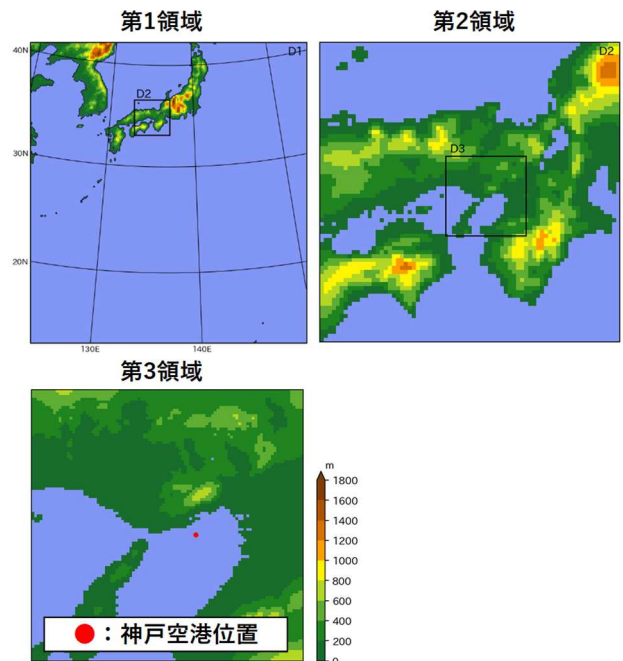


図-4 実験モデル

表-3 WRF実験条件

|                                          | 第1領域                    | 第2領域 | 第3領域 |
|------------------------------------------|-------------------------|------|------|
| 水平格子間隔                                   | 15km                    | 5km  | 1km  |
| 計算ステップ                                   | 60 秒                    | 20 秒 | 4 秒  |
| 鉛直層                                      | 61 層 (地上ほど密に設定)         |      |      |
| 初期値・境界値                                  | NCEP FNL                |      |      |
| 標高・土地利用データ                               | WPS 標準データセット (30 秒メッシュ) |      |      |
| 雲微物理スキーム<br>(mp_physics)                 | WSM6                    |      |      |
| 放射スキーム<br>(ra_lw_physics, ra_sw_physics) | RRTM, Dudhia            |      |      |
| 積雲スキーム<br>(cu_physics)                   | Kain-Fritsch            |      |      |
| 境界層スキーム<br>(bl_pbl_physics)              | Mellor-Yamada-Janjic    |      |      |
| 接地層スキーム<br>(sf_sfclay_physics)           | Monin-Obukhov           |      |      |

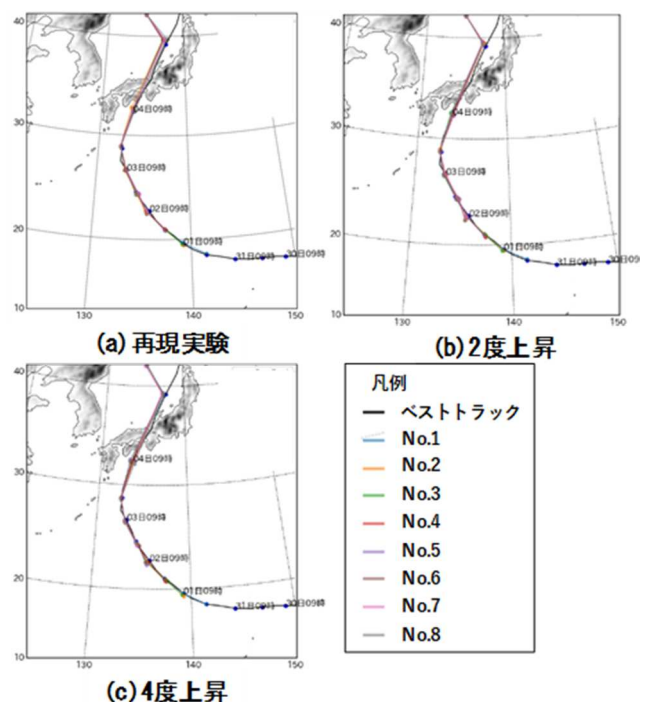


図-5 台風の経路

の幅を表し、点線は各時刻におけるメンバー平均を示している。再現実験と比較した場合、2度上昇および4度上昇の温暖化実験では、ピーク風速が増加する傾向が確認された。この傾向を定量的に評価するため、風速のピーク値についてメンバー平均値を各実験で比較し、その結果を表-4に示す。ピーク風速のメンバー平均値の比（再現実験を1.0とした場合）は、2度上昇では1.08、4度上昇では1.04となった。台風の中心付近のピーク風速と神戸空港アメダス地点のピーク風速に異なる傾向が見られた要因として、台風の経路による風向の変化や、それに伴う地形の影響が考えられる。さらに、20 m/s以上の風速が発生する時間を比較した結果、4度上昇の実験で最も長い時間となった。そこで、強風領域の広がりに着目して比較を行った(図-8)。温暖化の影響により、20 m/sおよび30 m/s以上の強風領域の広がりには顕著な差は見られなかったものの、台風が目がよりコンパクトになり、中心付近の風速が増大する傾向が見られた。

#### 4. まとめ

本研究では、地球温暖化が神戸空港付近の台風風速に与える影響を、d4PDFを用いた統計的予測とWRFを用いた数値シミュレーションの両面から評価した。

##### (1)統計的予測

- ・将来の温暖化気候において、神戸空港付近の100年確率風速は最大で4~5%程度上昇する可能性が示唆された。

##### (2)WRFによる検討

- ・台風事例を対象に数値シミュレーションを行った結果、地球温暖化に伴い神戸空港付近のピーク風速が最大で4~8%増大する傾向が見られた。
- ・台風自体の風速は、温度上昇とともに、強度が増す傾向が見られたが、対象地点の風速は、異なる傾向となった。地形や風向の影響を受けたためと考える。
- ・20 m/s以上の強風が吹く時間は温度上昇に伴い長くなる傾向にある。温度上昇に伴い、台風が目が小さくなり、30m/s以上の風が吹く範囲が大きくなるが、台風の規模自体は変わらなかった。

本研究の結果は、地球温暖化が進行した場合、神戸空港を含む沿岸域において、台風による強風災害リスクが増大する可能性を示唆している。また、今回得られた知見を長大橋の耐風設計に活用していくことが求められる。

#### 参考文献

- 1) <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- 2) Masatoshi Kuroda, Akira Harada, Kikuro Tomine: Some Aspect on Sensitivity of Typhoon Intensity to Sea-Surface Temperature, Journal of the Meteorological Society of Japan. Vol.76,

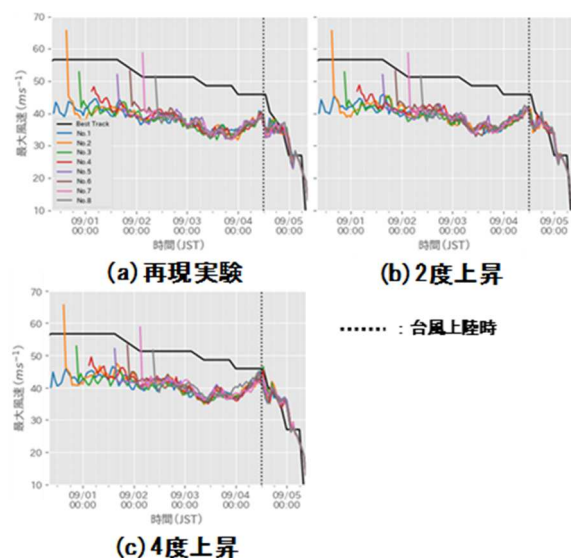


図-6 台風の中心付近の最大風速

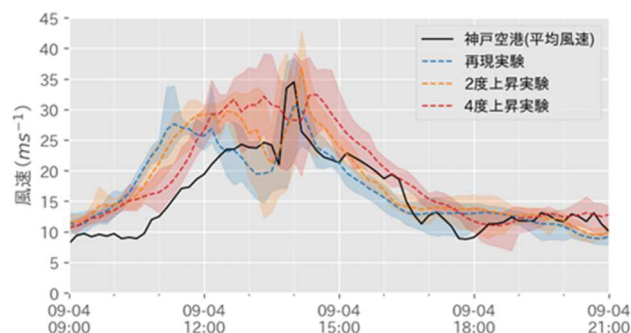


図-7 対象地点の地上10mの風速

表-4 ピーク風速平均値の比較

|        | ピーク平均値<br>(m/s) |      | 20m/s以上時間数<br>(メンバー平均, 分) |
|--------|-----------------|------|---------------------------|
| 再現実験   | 35.41           | 1.00 | 237.50                    |
| 2度上昇実験 | 38.13           | 1.08 | 257.50                    |
| 4度上昇実験 | 36.97           | 1.04 | 278.75                    |

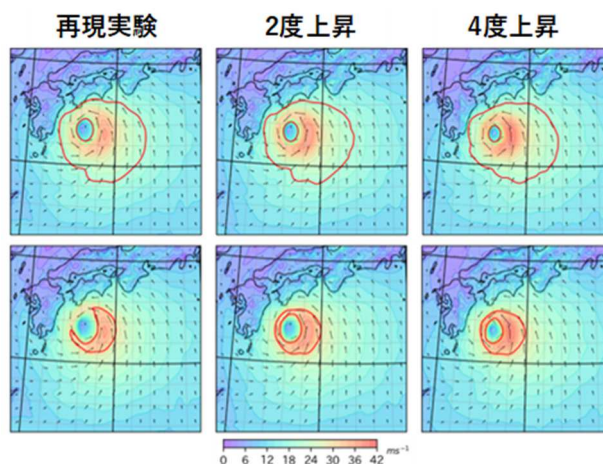


図-8 強風領域の比較  
(アンサンブル平均, 赤線は上:20m/s下:30m/s)

No.1, pp. 145-151, 1998.

3) Keita Fujiwara, Tetsuya Takemi, Nobuhito Mori: Response of Intensity and Structure of Typhoon Jebi (2018) before Landfall to 2-K and 4-K Warmed Future Climates in Dynamical Downscaling Experiment, SOLA. Vol. 19, 142-149, 2023.

4) [https://search.diasjp.net/ja/dataset/d4PDF\\_5kmDDS\\_JP](https://search.diasjp.net/ja/dataset/d4PDF_5kmDDS_JP)

5) 藤野陽三，伊藤學，酒井利夫：年最大風速記録による設計基本風速の算定に関する研究，土木学会論文報告集，第 305 号，1981.