

29. 確率台風モデルを用いた西日本の内湾の海上風速と高潮偏差の試算

Estimation of Extreme Marine Surface Wind Speed and Storm Surge in Closed Bays in West Japan
by Using Stochastic Typhoon Model

河合弘泰*・橋本典明**・松浦邦明***

Hiroyasu KAWAI*, Noriaki HASHIMOTO**, Kuniaki MATSUURA***

ABSTRACT; Since the terrible storm surge disaster by the Typhoon Vera in 1959, many storm surge defense facilities have been constructed on the coast of bays with disastrous storm surges. The occurrence probability of a higher tidal level than the design tidal level seems to be small, but it may increase due to global warming effects such as the mean sea level rise and typhoon intensification. This study, therefore, gave the value of typhoon parameters under current and future climates by a stochastic typhoon model, and estimated the extreme marine surface depression and wind speed, storm surge, and tidal level with a return period of 10 to 1,000 years in West Japan. The typhoon development region for the stochastic typhoon model was assumed to move toward the north by 1.5 degrees in latitude from the current to future climate. The simulation result shows that large storm surge and high tidal level over the design condition may appear even under the current climate and that the return period may decrease significantly at some locations.

KEYWORDS; stochastic typhoon model, global warming, marine surface wind, storm surge, tidal level

1. はじめに

1959年の伊勢湾台風による高潮災害などを契機に、日本の高潮が顕著な内湾では一般に、①朔望平均満潮位に伊勢湾台風級の計画台風で生じる高潮偏差を加えた潮位、②既往最高の潮位、の何れかをもとに計画高潮位を定め、堤防や護岸などの高潮対策施設を築造してきた。そのおかげもあってか、伊勢湾台風を最後に百人以上の死者を伴う大規模な高潮災害は起きていない。しかし、IPCCの報告書¹⁾が指摘するように地球温暖化で平均海面が上昇し台風が強大化すれば、大規模な高潮災害が再発するかも知れない。このような危機があって、計画台風の勢力を数割増やした場合の高潮やそれによる浸水域の試算がなされてきた^{2),3),4),5)}。

その一方で、1999年の台風18号によって八代海や瀬戸内海西部では、大潮の満潮時頃に顕著な高潮・高波が発生し、潮位が計画高潮位だけでなく堤防の天端も超えた地区がある。2004年の台風16号でも、高松で既往最高潮位が更新され市街地が浸水したことは、まだ記憶に新しい。これらの災害は我々に「温暖化の影響が本格的に現れる前でも、想定外の高潮は発生し得る」ことを再認識させた。高潮偏差は台風のコースに対して敏感であり、過去にその地方に接近した台風と同じ勢力でもコースによっては、これまでに経験のない高潮偏差が生じることもある。また、たとえ全く同じ高潮偏差が生じたとしても、そのときの天文潮位が満潮位と干潮位のどちらに近いかで、実際に生じる潮位には大きな差が出る。したがって、「温暖化によって想定外の高潮が発生するようになる」のではなく、「今でも想定外の高潮はごくまれに発生し得るが、温暖化によってそれが少し身近になる」と捉え、確率的な意味づけをすることも重要である。

* (独法) 港湾空港技術研究所 Port and Airport Research Institute

** 九州大学大学院工学研究院 Faculty of Engineering, Kyushu University

*** (財) 日本気象協会 Japan Weather Association

このようなまれな現象を推定する方法の一つとして、確率台風モデルがある。確率台風モデルとは、過去の台風の属性値(例えば、中心位置、中心気圧、最大風速半径)を統計処理して得た、属性値の出現確率分布や自己回帰式に基づいて、モンテカルロ法で任意の期間の属性値を与えるものである(図-1を参照)。ただし、このモデルはあくまで台風の統計に基づく数学的なモデルであり、台風ごとに気象の諸現象を計算するものではない。

本研究では、このモデルで現在と将来の気候条件における様々なパターンの台風を与え、これらの台風で生じる海面気圧や海上風の変化、高潮を推算した。そして、九州沿岸から瀬戸内海までの西日本における気圧低下量、海上風速、高潮偏差、潮位の極値を試算した。

2. 本研究で用いたモデル

2.1. 確率台風モデル

本研究では、1951～2000年の台風の統計に基づく確率台風モデル⁶⁾を用いて、「現在」の気候条件下の台風を与えた。また、「台風属性値の時間変化量の空間場が現在よりも北へ緯度で1.5°移動する」と仮定した確率台風モデル⁷⁾で、「将来」の気候条件下の台風を与えた。

再現期間が1,000年までの高潮偏差や潮位の極値を調べることが本研究の目的の一つであるので、それぞれの気候条件下で500年分の台風を用いることにした。そして、九州～関東地方に顕著な高潮を発生させる可能性がある台風として、図-2に示す楕円(東経134.5°、北緯33.5°を中心に、真東から北へ30°方向に長半径800km、これと直交方向に短半径300km)を中心気圧が970 hPa以下で通過するもの(現在の気候条件下で1,301個、将来で1,399個)を抽出した。

2.2. 海上風と高潮の推算モデル

それぞれの台風の海面気圧と海上風の分布は、実務でよく使われている経験的モデルの一つ⁸⁾によって与えた。すなわち、海面気圧の分布にはMyersの式、

$$p = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (1)$$

を用いた。ここに、 p は中心から距離 r だけ離れた点の気圧、 p_c は中心気圧、 Δp は気圧深度、 r_0 は最大風速半径である。海上風は傾度風と場の風に分けて計算したものをベクトル合成した。傾度風の成分 U_1 は、

$$U_1 = C_1 U_{gr} = C_1 \left[-\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \right] \quad (2)$$

により与えた。ここに、 C_1 は風速低減係数(本論文では0.65)、 f はコリオリの係数、 ρ_a は大気密度であ

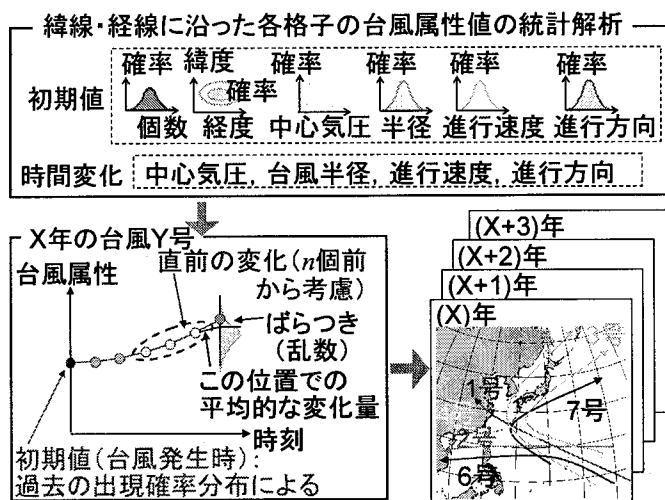


図-1 確率台風モデルの概念

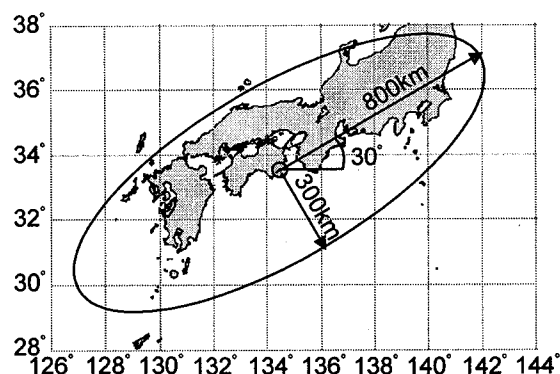


図-2 台風の抽出範囲

る。風向は等圧線の接線方向から台風を中心側に 30 deg だけ偏向させた。場の風の成分 U_2 は、

$$U_2 = C_2 \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V_T \quad (3)$$

により与えた。ここに、 C_2 は風速低減係数（本論文では C_1 と同じ）、 V_T は台風の進行速度である。この成分の風向は台風の進行方向と同じとした。なお、内湾の高潮推算の実務では、陸上地形の影響を取り込むために、観測風との相関や MASCON モデルによって風場を空間的に補正することもあるが、本研究では両気候条件で 2,700 個もの台風を対象とするため、このような補正を省略して演算時間を短縮した。

次に、この海面気圧と海上風を外力として、単層の線形長波方程式に基づく数値計算モデル⁸⁾で海水の流れを計算した。その計算領域は、図-3 に示すように、九州～関東地方の沿岸を 1.8 km 間隔の格子で表現したものである。さらに、代表的な数地点に対しては、このように推算した高潮偏差と時系列と、乱数で選択した日の天文潮位の時系列を線形和して、潮位の時系列を求めた。九州西岸や瀬戸内海には、大潮時に満潮位と干潮位との差が 3 m を超すところもあるためである。

こうして得られた、それぞれの台風時の気圧低下量、海上風速、高潮偏差、潮位の極値を Gumbel 分布（極値 I 型分布）、極値 II 型分布（ $k=2.5, 3.33, 5, 10$ ）、Weibull 分布（ $k=0.75, 1, 1.4, 2$ ）にあてはめ、MIR 指標で最適な分布を選択し、再現年数が 10～1,000 年の極値を推定した。

なお、以上の方法は瀬戸内海のみを検討の対象とした前報⁹⁾に準じており、本論文では九州沿岸～瀬戸内海までの西日本を対象とした解析結果について記す。

3. 海上風速と高潮偏差の極値の特性

3.1 気圧低下量と海上風速

高潮は主として、①海面気圧の低下による海面の吸い上げ、②強風による海水の吹き寄せ、によって生じ

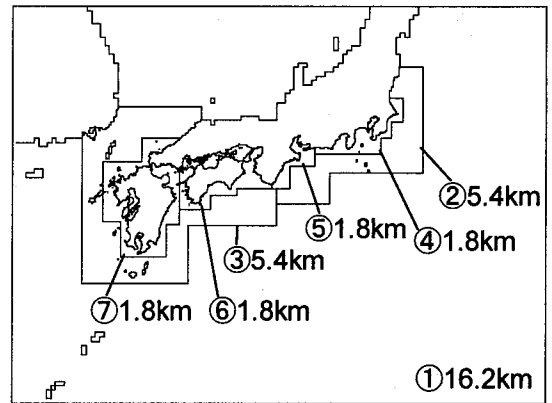


図-3 高潮推算に用いた計算格子

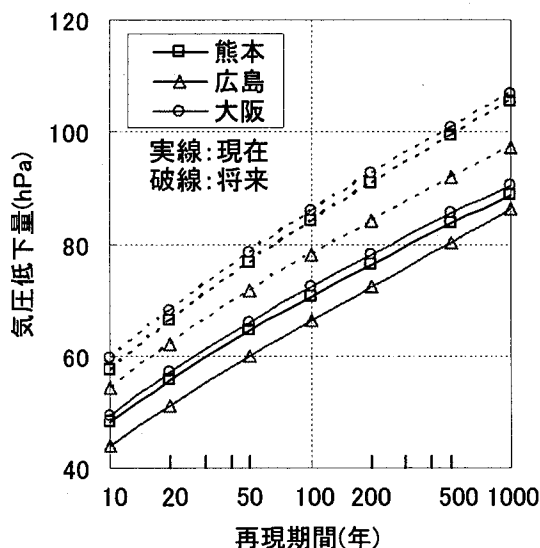


図-4 気圧低下量の極値分布

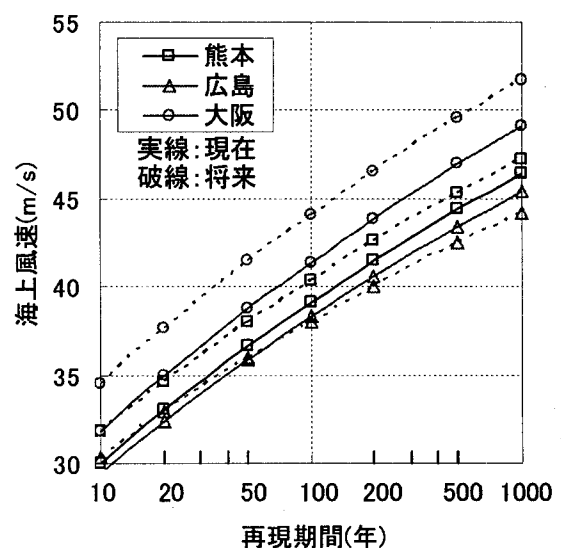
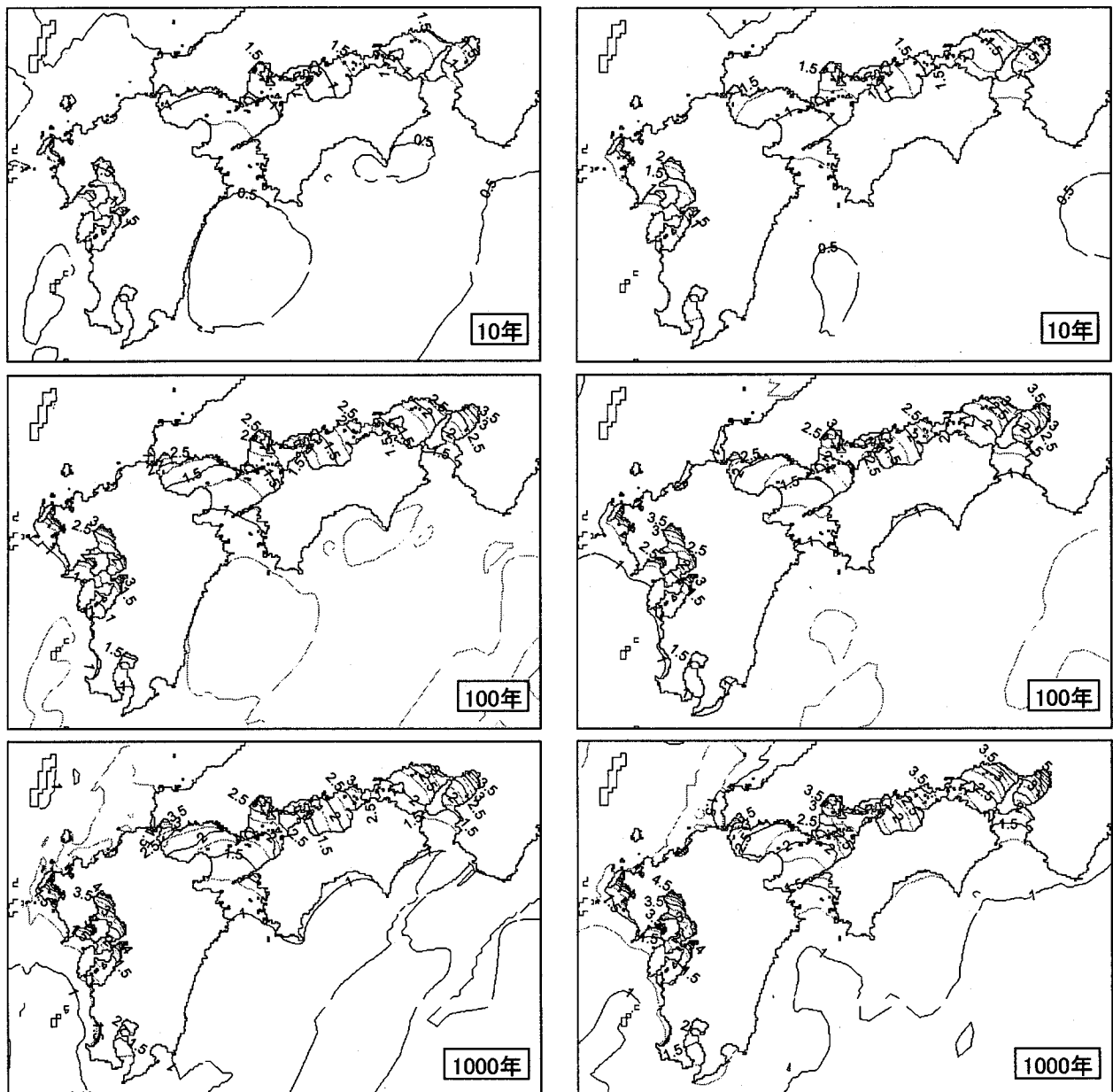


図-5 海上風速の極値分布

る。海面の吸い上げ量は、海面に作用する気圧と水位が静的に釣り合った状態で、1 hPaにつき約1 cmである。吹き寄せによる海面の上昇量は、静的に釣り合った状態で、概ね海上風速の2乗と湾口からの距離に比例し、水深には反比例する。そして、台風が移動して海面気圧や海上風が時々刻々変化する実現象においては、これらに動的な効果も加わる。以上のように、高潮は海面気圧や海上風速と密接な関係がある。

このことも踏まえながら、気圧低下量（本論文では1,013 hPaを基準）の極値分布の例を図-4に示す。これらの地点では、現在の気候条件で、10年確率の気圧低下量が50 hPa程度、100年確率では70 hPa程度と推定される。また、本研究で仮定する将来の気候条件では、100年確率で現在より10 hPa程度大きな値になっている。なお、ここに示した地点以外では、多くの台風でコースの上流側となる、九州の南岸や西岸で気圧低下量は大きく、瀬戸内海では南側で気圧低下量が大きい、という平面分布が得られた。

図-5は海上風速の極値分布を示す。ただし、ここでいう海上風とは、前述した簡易なモデルで推算した



(a) 現在の気候条件

(b) 将来の気候条件

図-6 再現期間10～1,000年の高潮偏差の平面分布

風（10 分間平均風速）であり、これらの地点で陸上地形の影響を受けながら吹く現実の風（あるいは気象官署等で観測される風）とは異なるが、沖合で高潮を発達させる風と位置づけることができる。この図から、現在の気候条件において、10 年確率の海上風速は 30 m/s 程度、100 年確率では 40 m/s 程度と推定される。また、本論文で仮定する将来の気候条件では、現在より大きな風速になる地点もある。なお、これらの地点では東に位置する大阪の風速が最も大きい、これには台風の進行速度が深く関係しているものと思われる。

3.2 高潮偏差

現在の気候条件における 10～1,000 年確率の高潮偏差の分布を図-6(a)に示す。八代海、有明海、広島湾、大阪湾など南北に長い内湾では、台風が湾の西側を北進する間の南風により、湾の北端で高潮偏差が大きくなる。他方、周防灘では、台風が湾を横断あるいは西側を北進する間の東風や大きな気圧低下により、湾の西端で高潮偏差が大きくなる。100 年確率の高潮偏差は、これらの内湾のほぼ全域で 1 m 以上と推定され、一部では 3 m を超えている。伊勢湾台風によって名古屋では 3.5 m の高潮偏差が生じ、これは検潮記録としては今なお日本最大であるが、100 年あるいは 1,000 年確率の高潮偏差がこれを超える海域もある。図-6(b)は、本論文で仮定する将来の気候条件における高潮偏差であり、現在より全体的に大きな値が得られた。

図-7 は、特徴的な地点を選んで高潮偏差の極値分布を示す。まず、鹿児島と高松の高潮偏差は、長い再現期間に対してもあまり大きくならず、現在と将来の気候条件による差（台風強大化の影響）も小さい。鹿児島は水深の深い鹿児島湾の中ほどに位置し、高松の位置も大きな内湾の風下側ではないため、もともと大きな高潮偏差は発生しにくいところである。他方、大阪と広島では、現在の気候条件でもまれに大きな高潮偏差が生じ、台風強大化の影響も受けやすい。例えば大阪では、計画高潮位に 3 m の高潮偏差を想定しており、その再現年数は現在の気候条件では 100 年程度と推定されるが、本論文で仮定する将来の気候条件では数十年に短縮される。ここに示す他の地点でも、同じ高潮偏差に対する再現年数は数分の一になり得る。

3.3 潮位（=天文潮位+高潮偏差）

図-8 は、潮位（=天文潮位+高潮偏差）の極値分布を示す。ここで示す潮位は、最低水面 CDL（海図の基準面、ほぼ大潮の干潮位）を基準としたものであり、将来の潮位には平均海面上昇量として、IPCC の予測

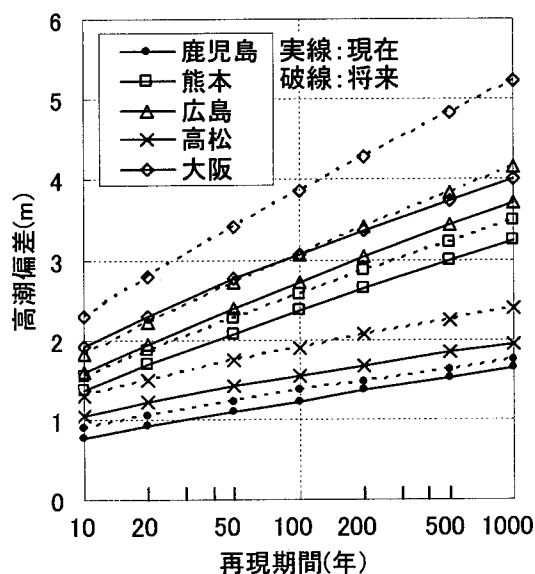


図-7 高潮偏差の極値分布

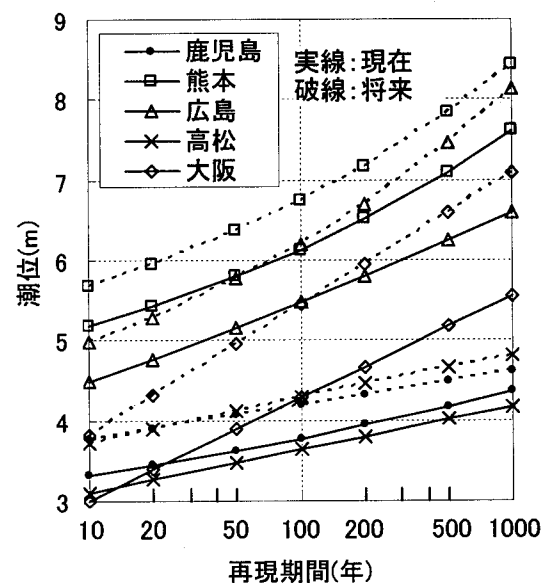


図-8 潮位の極値分布

範囲¹⁾に含まれる 0.4m を一律に加えている。この図の地点のうちで、鹿児島と高松の潮位は、長い再現年数に対してもあまり高くなり、温暖化の影響に占める平均海面上昇の割合が大きい。他方、大阪や広島では、現在の気候条件でもまれに非常に高い潮位が発生する可能性があり、平均海面上昇と台風強大化の両方の効果でその潮位は発生しやすくなる。例えば、大阪では、計画高潮位を 4.9 m 程度にしており、この再現期間は現在の気候条件では数百年と推定されるが、本論文で仮定する将来の気候条件では数十年に短縮すると考えられる。この図に示す他の地点でも、同じ潮位に対する再現年数は数分の一に短縮することが分かる。

4. おわりに

本研究では、現在と将来の気候条件における 500 年分の台風の属性値を確率台風モデルによって与え、それぞれの台風時の気圧降下量、海上風速、高潮偏差、潮位を推算するとともに、九州沿岸から瀬戸内海までの西日本におけるこれらの極値を試算した。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 現在の気候条件でも想定を上回る高潮偏差や潮位が発生する可能性はあるが、その確率（発生頻度）は平均海面上昇や台風強大化によって数倍にも高まる可能性がある。
- ② 高潮偏差や潮位の極値分布には、まれに（長い再現年数で）大きな値に遭遇し得るか、温暖化（平均海面上昇や台風強大化）の影響を受けやすいか、という 2 つの観点で海域特性があり、決して西日本で一律ではない。現在の気候条件で高潮偏差が顕著なところでは台風強大化の影響も受けやすい、という傾向も見られる。

しかしながら、本研究では、温暖化に伴う台風特性の変化を「台風の属性値の時間変化量の空間場が北へ緯度で 1.5 度移動する」と仮定し、比較的簡便なモデルで海上風や高潮を推算したため、得られた高潮偏差や潮位などの極値の不確定性は小さくないものと思われる。したがって、温暖化に関する最新の知見を取り入れながら、確率台風モデルを改良していく必要がある。また、海上風や高潮の推算モデル自体を高精度なものに置き換えるとともに、海峡付近や八代海の北東部など狭隘な海域に対しては空間分解能を高める必要がある。これらのことを今後の課題として考えている。

参考文献

- 1) IPCC Working Group 1 (2007) : Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers.
- 2) 筒井純一・磯部雅彦(1992) : 地球温暖化後の東京湾における高潮の予測, 日本沿岸域会議論文集, No.4, pp.9-19.
- 3) 河合弘泰(1999) : 地球温暖化による防波堤の滑動遭遇確率の変化, 第 7 回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.321-326.
- 4) 舒 岩・三村信男(2006) : 地球温暖化を考慮した伊勢湾における高潮予測, 第 14 回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.253-258
- 5) 藤巻英明・信岡尚道・三村信男(2006) : 海面上昇による茨城県海岸の高潮被害の変化予測, 第 14 回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.259-264
- 6) 橋本典明・川口浩二・河合弘泰・松浦邦明・市川雅史 (2003) : 港湾・海岸構造物の合理的設計を目的とした確率台風モデルの構築と精度の検討, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.176-180.
- 7) 橋本典明・河合弘泰・松浦邦明(2005) : 地球温暖化を考慮した将来の台風特性の解析と確率台風モデルへの導入, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.1221-1225.
- 8) 河合弘泰・本多和彦・富田孝史・柿沼太郎(2005) : 2004 年に発生した台風の特徴と高潮の予測・再現計算, 港湾空港技術研究所資料, No.1103, 34p.
- 9) 河合弘泰・橋本典明・松浦邦明(2006) : 確率台風モデルの構築とそれを用いた地球温暖化に伴う高潮の出現特性の変化に関する試算, 第 14 回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.247-252.