

36. 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

Development of Stochastic Typhoon Model and Its Application to Evaluation
of Variation of Storm Surge Occurrence Characteristics due to Global Warming

河合弘泰*・橋本典明**・松浦邦明***

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

ABSTRACT; A stochastic typhoon model, simulating typhoon parameters with the Monte Carlo method, has been developed based on statistics of the actual typhoons in the present climate. The other model simulating typhoon parameters in a future possible climate under global warming was also developed based on a correlation analysis of the plane distributions of typhoon statistics between these climates provided by the JMA-RCM20 Model. The parameters of typhoons during a long period were determined with these models and the storm surges in Seto Inland Sea were computed with a numerical storm surge model. Then the 10 to 1,000-year-return storm surges and tidal levels were compared between these climates. The result shows that the global warming effect in typhoon occurrence characteristics would magnify the storm surges and that both the effect and mean sea level rise would increase the tidal levels.

KEYWORDS; stochastic typhoon model, global warming, storm surge, tidal level, mean sea level rise

1. はじめに

これまで東京湾、伊勢湾、瀬戸内海、有明海、八代海では、台風接近時に海面気圧の低下や吹き寄せによって顕著な高潮が発生してきた。例えば最近でも、1999年の台風18号や2004年の台風16号の時には、護岸など海岸の防護施設が破壊され、住宅地が浸水し、溺死者を伴う災害に至っている¹⁾。地球温暖化によって平均海面が上昇し台風も強大化すれば、高潮はこれまで以上に顕著となり、高潮災害も発生しやすくなると考えられる^{2), 3)}。地球温暖化の将来予測には未だ不確かな部分もあるが、現在考えられる可能性の中で高潮の出現特性がどのように変化し得るかを予測しておくことは、今後の高潮防災の検討にも役立つ。

さて、ある海岸で高潮防災のレベルを考えるとときには、その海岸で発生し得る最大級の高潮（例えば、再現年数で数百年以上の高潮偏差あるいは潮位）が重要な想定外力の一つになる。ただし、台風が日本列島のどこかに上陸する頻度は年平均2~3回と少なく、その海岸に顕著な高潮を発生させる台風の頻度はさらに少ない。また、たとえ同じ強さの台風が接近しても、コースが少しそれるだけで（例えば、西側と東側のどちらを通過するかで）高潮の規模は大きく異なる。ところが、潮位観測データの蓄積は長いところでも半世紀程度であり、地球温暖化の予測計算でも10年間ないし20年間の台風の統計値が整理されている^{4), 5)}。これらのデータだけで様々な強さやコースの台風を網羅し、顕著な高潮の出現特性を調べることは難しい。

この問題を解決する一つの方法として「確率台風モデル」があり、その概念図を図-1に示す。このモデルは、任意の年数間に発生する台風の属性値を、過去と同じ出現確率分布を満たすように、モンテカルロ・シミュレーションで与えるものである。本研究では、現状と将来の気候に対応したモデルを構築するととも

* (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

に、それぞれのモデルで与えた台風に対する高潮の出現特性を調べた。

2. 確率台風モデルの構築

本研究ではまず、日本列島周辺に来襲した台風の属性値（位置、中心気圧は1951～2000年、最大風速半径は1951～1999年）を5つの季節（6～7月、8月、9月、10月、それ以外）に分けて統計処理し、確率台風モデルを構築した（以下では「現在の気候下に対する確率台風モデル」と記す）⁶⁾。このモデルでは、各年における台風の発生個数を過去の実績値に基づくポアソン分布で与えた。そして、個々の台風においては、初期位置（緯度、経度）を過去の累積度数分布に従う乱数で与え、ある時刻*i*の属性値*T_i*を1時間前の属性値*T_{i-1}*から、

$$\begin{aligned} T_i &= T_{i-1} + \Delta T_i \\ &= T_{i-1} + \Delta S(x_i, y_i) + Z_i \\ &= T_{i-1} + \Delta S(x_i, y_i) + \sum_{m=1}^n A_m Z_{i-m} + v_i \end{aligned} \quad (1)$$

と与えた。ここに、 ΔT_i は属性値の時間変化量であり、平均場 $\Delta S(x_i, y_i)$ と偏差 Z_i の和で与えた。この偏差 Z_i は*n*次（本研究では*n*=8）の自己回帰式で与え、その自己回帰係数 A_m とランダム成分 v_i は最小自乗法により推定した。本研究より前に様々な確率台風モデルが構築されているが^{7), 8)}、本研究のモデルには、季節別に統計解析を行い、台風の中心位置に2次元、中心気圧と最大風速半径に1次元の自己回帰モデルを導入した点に特徴がある。図-2は中心気圧の平均値の分布であり、(b)に示す確率台風モデルによる分布（50年間を乱数列を変えて10回繰り返して得た平均）は、(a)に示す実際の分布を空間的に平滑化したようなものになっている。

さて、気象庁・気象研究所では、温暖化ガスの排出シナリオに関するIPCC特別報告書のシナリオA2⁹⁾に基づいて、日本周辺の気象を水平分解能が20kmの日本域気候モデルMRI-RCM20で予測している⁴⁾。本研究では、その予測結果のうち1981～2000年と2081～2100年の気圧と風の日平均値を用いて台風を抽出し、その出現特性を解析した。その結果、1981～2000年の属性値の時間変化量の空間平均場を北へ緯度で1.5°または東へ1.5°平行移動させた場合に、2081～2100年の空間平均場との相関係数が極大になった。そこで、地球温暖

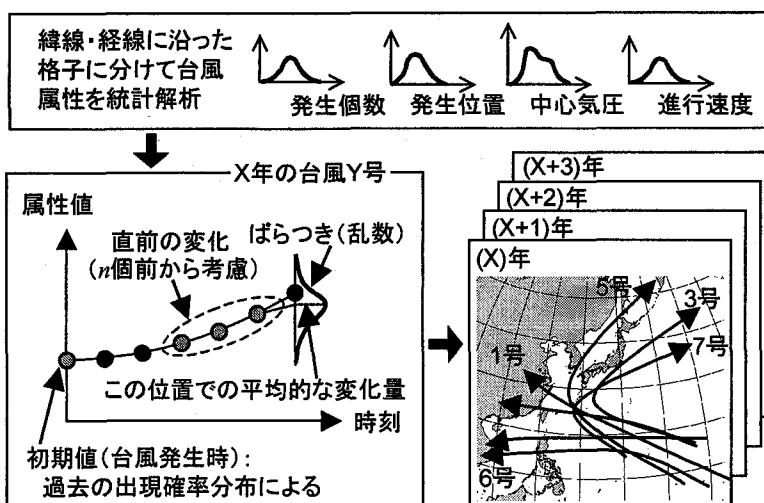
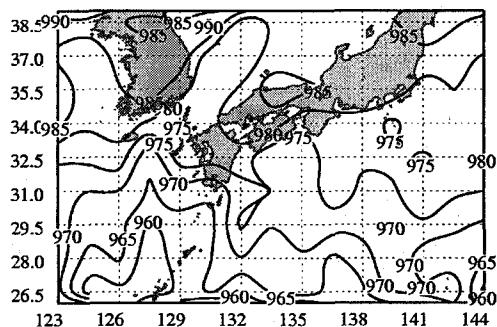
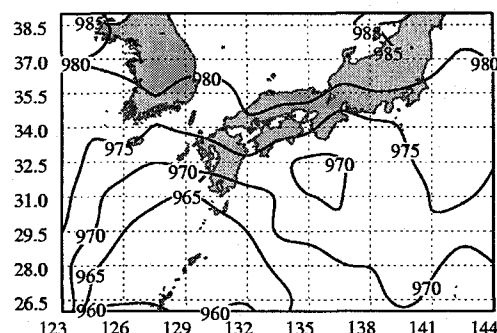


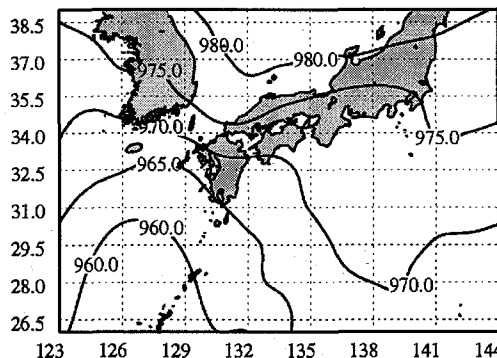
図-1 確率台風モデルの概念



(a) 実際の台風 (1951～2000年)



(b) 現在の気候下に対する確率台風モデル



(c) 将来の気候下に対する確率台風モデル

図-2 中心気圧の平均値 (単位: hPa)

化で考えられる単純なシナリオの一つとして、北へ 1.5° 平行移動した場合（以下では「将来の気候下」と記す）に対応した確率台風モデルも構築した¹⁰⁾。ただし、台風の発生位置、初期の中心気圧や最大風速半径、自己回帰モデルは現在の気候下と同じものを用いた。図-2(c)は将来の気候下における中心気圧の平均値の分布であり、(b)に示した現在の気候下に比べて特に西日本で低い値となった。

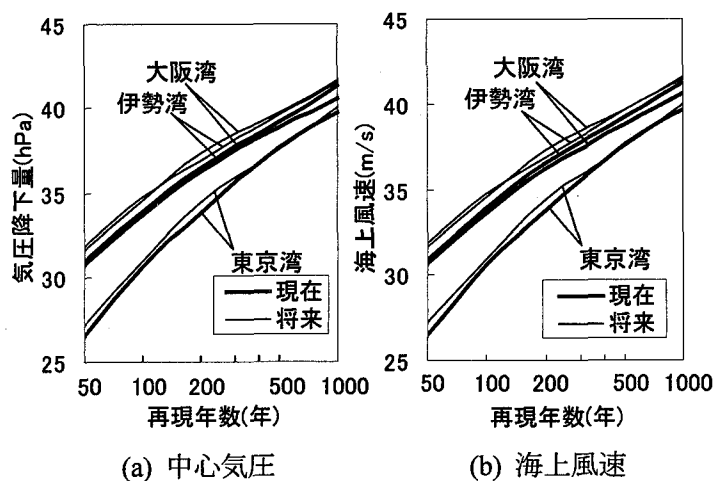


図-3 三大湾における気圧降下量と海上風速の出現分布

3. 気圧と風速の極値分布

確率台風モデルで与えたそれぞれの台風に対し、Myers の気圧分布を仮定し、気圧傾度風と台風の移動の効果を考慮する経験的力学モデルで、海上風を推算した。図-3 は、三大湾それぞれの中心から半径 300km の円を通過した台風による気圧降下量（1,010hPa を基準）と湾の中心における海上風速（10 分間平均）の出現分布を示す。現在の気候下でも、大阪湾や伊勢湾では東京湾に比べ気圧降下量や風速の大きな台風に遭遇しやすい。現行の高潮対策施設の設計では伊勢湾台風級のモデル台風を想定しているが、その勢力の台風に遭遇する確率は三大湾において同一とは言えない。また、将来の気候下では、何れの湾でも気圧降下量と風速が現在より大きくなり、その変化は大阪湾で最も著しい。

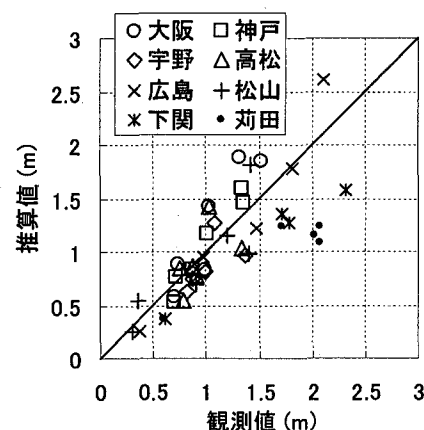


図-4 高潮偏差の計算精度

4. 高潮偏差の極値分布

瀬戸内海の高潮偏差を、単層の線形長波方程式に基づく数値計算モデルによって、1.8km 間隔の計算格子で推算した。図-4 は、あらかじめその精度を確認するために、実際の 6 個の台風（9810, 9918, 0310, 0416, 0418, 0514 号）の高潮偏差を推算した結果である。周防灘の北西岸に位置する苅田や下関を除くと、観測値に近い値が得られている。この計算にはパソコン（CPU: Pentium 4 -3.6 GHz）で 1 つの台風につき 20~30 分が必要であり、これを踏まえて本研究では 500 年分の台風を対象にすることにした。そして、瀬戸内海の少なくとも一部に顕著な高潮を発生させる可能性のある台風として、東経 132.5° 、北緯 34° （広島付近）を中心に南北に短半径 200km、東西に長半径 400 km とする楕円を、980hPa 以下の中心気圧で通過する台風（現在と将来の気候下でそれぞれ 795 個、884 個）を抽出した。

これらの台風による高潮偏差を 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、その極値分布における様々な再現年数に対する値を求めた結果が図-5 である。まず、(a)に示すように、現在の気候下において 50 年確率の高潮偏差は瀬戸内海のほとんどの領域で 1m 以上であり、広島湾、備後灘、播磨灘、大阪湾のそれぞれ北東部では 2m を超えている。500 年分の計算で得られた最大の高潮偏差は、大阪湾の北東部や周防灘の北西部で 3 m を超え、現行の高潮対策施設で想定している伊勢湾台風級のモデル台風による高潮偏差を上回った。次に、(b)に示すように、将来の気候下では現在に比べて高潮偏差の値は全体的に大きくなっている。ただし、図-6 に図-5 の(b)と(a)の差を示すように、その増加量は瀬戸内海で均一ではなく、大阪湾、播磨灘、広島湾のそれぞれ北東部、周防灘の西部など、現在の気候下で高潮の顕著な海域でさらに顕著になると考えられる。

図-7 は、瀬戸内海の代表的な地点について高潮偏差の極値分布を示す。まず現在の気候下についてこれ

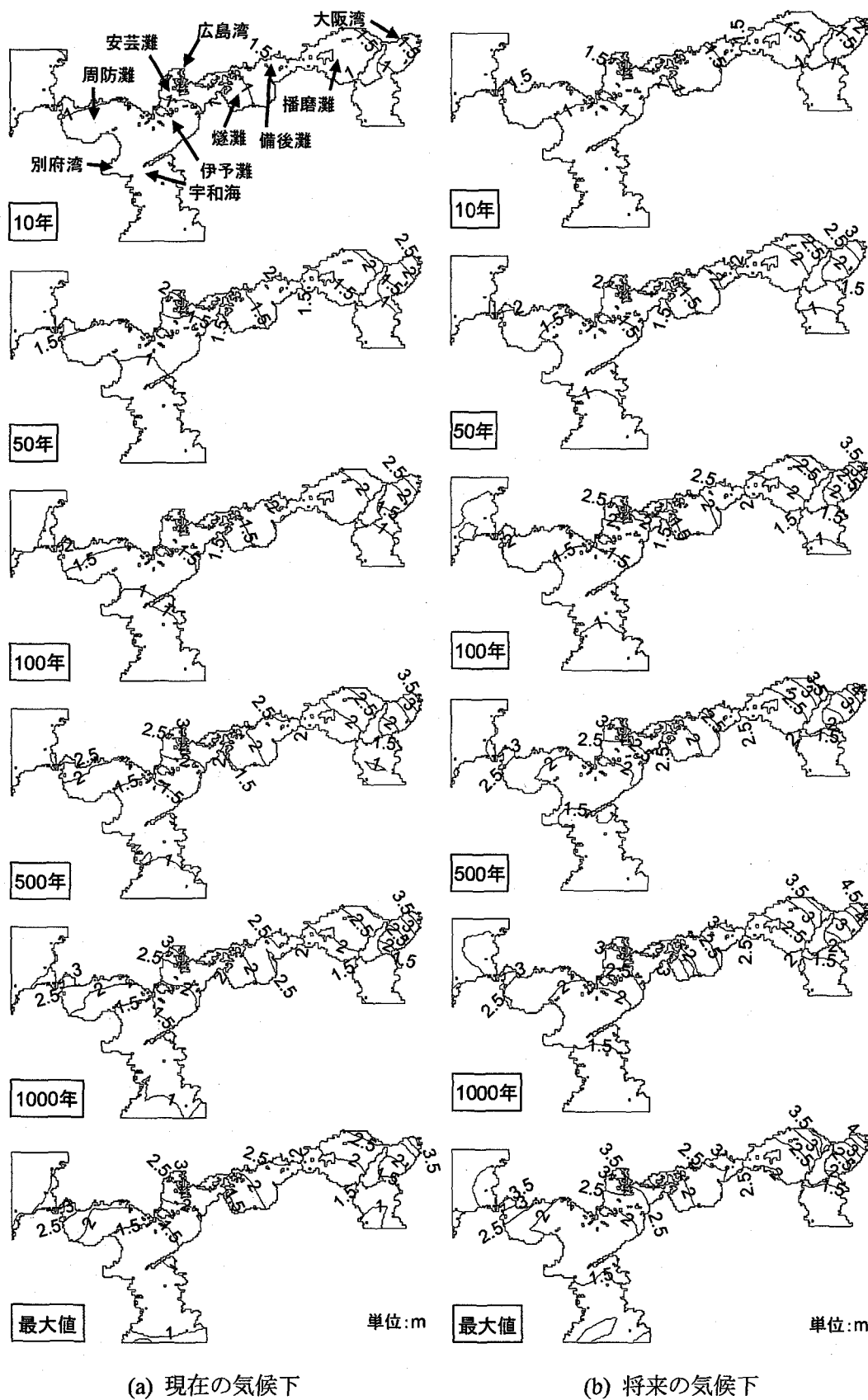


図-5 様々な再現年数に対する高潮偏差と500年分の計算で最大の高潮偏差

らの地点を比較すると、大阪、神戸、広島では、極値分布関数の傾きが大きく、発生確率は小さいながらも2.5mを超える非常に大きな高潮偏差に遭遇する可能性がある。その他の地点では、極値分布関数の傾きが小

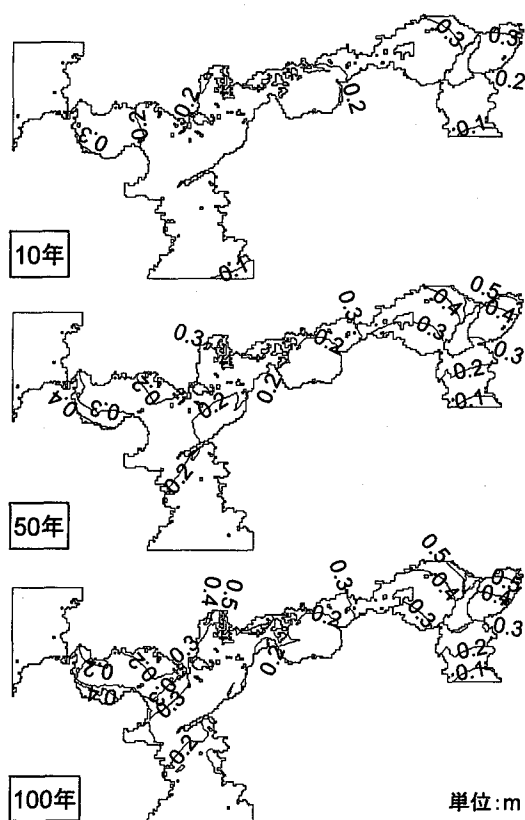


図-6 地球温暖化による高潮偏差の変化

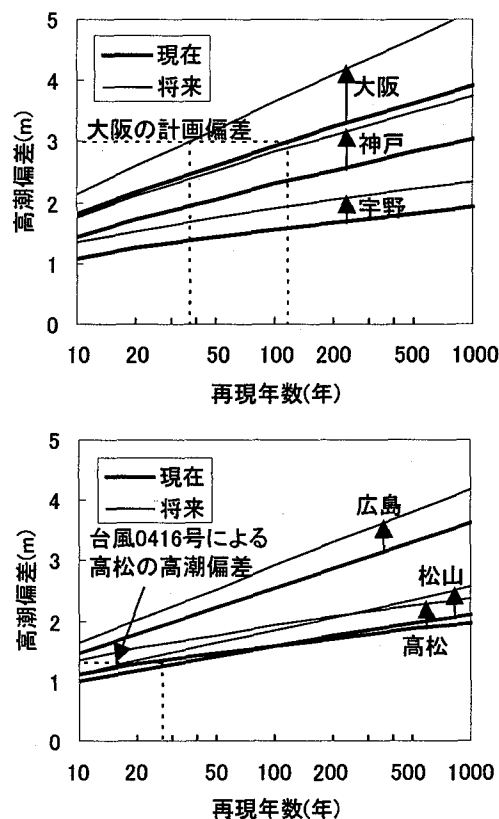


図-7 高潮偏差の極値分布

さく、2m を超える高潮偏差は生じにくい。次に将来の気候下を現在と比較すると、高潮偏差の増加は大阪と神戸で著しいことが分かる。これらのことから、瀬戸内海は、①地形的特徴のために大きな高潮偏差が発生するか、②地球温暖化（台風特性の変化）で高潮偏差が増大するか、という2つの尺度で分類できると思われる。ところで、大阪湾の高潮対策施設で想定している高潮偏差は3mであり、この再現年数は現在の気候下で約120年、将来には約40年まで縮むと推定される。また、台風0416号によって高松に生じた1.33mの高潮偏差も、約30年から約10年に縮むと推定される。

5. 潮位の極値分布

瀬戸内海のアストロ潮汐差（干満の差）は大潮時に1.5～4mに達するため、同じ高潮偏差が生じて、それが満潮時か干潮時かによって実際に生じる潮位（＝天文潮位＋高潮偏差）の高さは大きく異なる。そこで、前章で求めたそれぞれの台風による高潮偏差の時系列に、調和定数から計算した天文潮位を線形的に足し合わせて、潮位の時系列を求めた。

このように求めた、最低水面CDL（大潮の干潮位に近い）を基準とする潮位の極値分布を図-8に示す。ただし、将来の気候下の潮位には、シナリオA2で予測されている平均海面上昇量⁹⁾として約0.4mも加えている。何れの地点でも、台風特性の変化と平均の海面上昇によって、高い潮位が発生しやすくなっている。これら二つの要因が占める比率は地点によって異なり、大阪と神戸では他の地点に比べて台風特性の変化の影響が強いようである。なお、大阪の現行の計画高潮位の再現年数は、現在の気候下では約400年であるが、将来には約60年まで縮むものと推定される。高松の台風0416号による最高潮位も、約200年から約10年の身近なものになると推定される。

6. おわりに

本研究では、任意の年数間における台風属性値をモンテカルロ・シミュレーションで与える「確率台風モデル」を構築するとともに、地球温暖化に伴って台風属性値の時間変化量の空間場が北緯度で1.5°移動するという仮定の下に、三大湾における台風時の気圧降下量や風速の出現特性、瀬戸内海における高潮の出現特性を調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 現在の気候下では、東京湾より大阪湾や伊勢湾で勢力の強い台風に遭遇しやすい。地球温暖化に伴う台

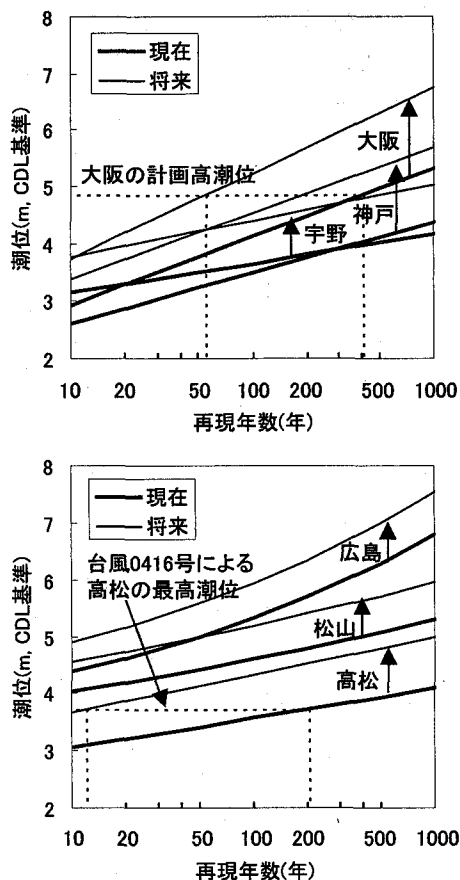


図-8 潮位の極値分布

風特性の変化で、これら三海域ともに強い台風に遭遇しやすくなる可能性があり、その変化は大阪湾で最も著しいと考えられる。

- ② 瀬戸内海では、地球温暖化に伴う台風特性の変化によって、大きな高潮偏差が発生しやすくなる可能性がある。また、台風特性の変化と平均海面の上昇の両方によって、高い潮位が発生しやすくなる可能性もある。これらの変化は瀬戸内海において一様ではないと考えられる。

なお、本研究では、地球温暖化に伴う台風特性の変化を単純に仮定し、海上風や高潮の推算にも簡易なモデルを用いた。そのため、ここに示した高潮偏差や潮位の極値分布には大きな不確定性も残されている。今後も引き続き、地球温暖化に関する知見を取り入れながら、将来の高潮の出現特性について検討を進めたい。

謝辞

気象研究所環境・応用気象研究部第三研究室の栗原和夫研究室長および独立行政法人国立環境研究所社会環境システム研究領域の原沢英夫領域長からは、MRI-RCM20 の予測計算値を使用させていただき、ここに記してお礼を申し上げたい。

参考文献

- 1) 河合弘泰・平石哲也・丸山晴広・田中良男(2000)：台風 9918 号による高潮の現地調査と追算，港湾技研資料，No.971，43p.
- 2) Kawai, H. (2000): Variation of Sliding Failure Probability of Breakwater Caisson due to Global Warming, Journal of Global Environment Engineering, vol. 6, pp.65-80.
- 3) 酒井和彦・岡安章夫(2004)：温暖化による海面上昇を考慮した防波堤の信頼性設計法，海岸工学論文集，第 51 巻，pp.686-690.
- 4) 石原幸司・栗原和夫・和田一範・村瀬勝彦・富澤洋介(2004)：洪水・渇水リスク評価に向けた MRI-RCM20 の降雨特性再現性，日本気象学会 2004 年秋季講演予稿集，論文番号 B169，p.145.
- 5) Oouchi, K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta, S. Kusunoki, and A. Noda (2006): Tropical Cyclone Climatology in a Global-Warming Climate as Simulated in a 20 km-Mesh Global Atmospheric Model: Frequency and Wind Intensity Analyses, Journal of the Meteorological Society of Japan, vol. 84, No.2, pp.259-276.
- 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) 端野道夫・桑田康雄(1987)：確率台風モデルによる降雨・高潮の同時生起性評価，土木学会論文集，No.387，II-8.
- 8) 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・伊藤吉孝(2000)：拡張型確率的台風モデルを用いた波高の極値推定システム，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.271-275.
- 9) IPCC(2001)：Climate Change 2001: The Scientific Basis, Working Group I, Chapter 11. Changes in Sea Level.
- 10) 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.