

確率台風モデルを用いた内湾の高潮の極値と継続時間の推定

Estimation of Extreme Value and Duration of Storm Surge in Bays by Using Stochastic Typhoon Model

河合弘泰¹・橋本典明²・松浦邦明³

Hiroyasu KAWAI, Noriaki HASHIMOTO, Kuniaki MATSUURA

In Japan many storm surge defense facilities have been constructed for the design tidal level taking account of the storm surge due to a standard typhoon based on the Typhoon Vera in 1959. Yet the tidal level over the design one may appear in small probability. This study, therefore, estimated the extreme storm surge with a return period of 10 to 1,000 years in major bays in Japan on the Pacific Ocean, by using a stochastic typhoon model. The result shows that the return period of the current design tidal level in three major bays is several hundred years or more under the current climate but it may change due to the variation of typhoon appearance characteristics under Global warming. The duration of the peak on the storm surge and tidal level variation with time is short in the majority of typhoons with a large storm surge.

1. はじめに

これまで高潮の顕著な内湾では、伊勢湾台風級の台風で生じる高潮偏差を考慮した潮位、あるいは既往最高潮位を、高潮対策施設の計画高潮位にしてきた。この計画高潮位は絶対に超えない潮位ではなく、1999年の台風18号や2004年の台風16号の際には、計画高潮位を超える潮位が発生して大災害が発生している。ところが、その頻度（遭遇確率）はあまり明らかにされていない。また、それが地球温暖化に伴う平均海面上昇や台風強化で増加することも危惧されている。したがって、まず、現在の気候条件下において伊勢湾台風級の高潮を確率的に評価する必要がある。また、将来の台風特性については信頼性の高い予測がなく、計画高潮位を見直せる段階ではないが、高潮の出現特性がどのように変わり得るのか検討すべき時期には来ていると考えられる。

その一方で、高潮対策施設の変形量や後背地の浸水高は、その台風の最高潮位や最大波高だけでなく、それらの継続時間にも依存する。しかしながら、これまでの設計では、継続時間を意識しない安全率で性能を照査するか、明確な裏付けもなく2時間程度の継続時間を仮定してきた。したがって、高潮の極値分布と継続時間特性の両方を明らかにすることが求められている。また、伊勢湾台風級の台風に確率的な意味づけをし、現在の防護レベルを明示することは、施政者による防災計画の立案はもとより、市民の防災意識の啓発にも役立つであろう。

ところが現実には、ある一つの地域において伊勢湾台

風級の台風に遭遇することは滅多になく、その高潮の特性を調べられるほど長期にわたる検潮記録が蓄積されている検潮所はまれである。そのため、確率台風モデルによって長期間に発生する台風の諸元を与え、それぞれの台風による高潮を推算する必要がある。この方法によって高潮偏差の極値を推定する試みも既にくつかなされているが（山口ら, 2002; 加藤ら, 2003; 河合ら, 2006）、その対象海域は限られている。

以上のことを踏まえ本研究では、台風に起因する高潮の顕著な内湾が分布する、九州から関東に至る太平洋沿岸（瀬戸内海沿岸を含む）を対象に、現在の気候条件下の台風を確率台風モデルで与え、その高潮を長波方程式の数値計算モデルで推算し、得られた高潮偏差や潮位の極値や継続時間特性を調べた。また、将来の気候条件下の台風も一つの仮定に基づく確率台風モデルで与え、その高潮を推算した。

2. 確率台風モデルと高潮推算の方法

(1) 確率台風モデル

確率台風モデルとは、過去の台風属性値（位置、中心気圧、最大風速半径）やその時間変化量の出現特性に基づいて、任意の年数間に発生する台風の属性値をモンテカルロ法で与えるものである。本研究では、1951～2000年の台風に基づく確率台風モデル（橋本ら, 2003）によって「現在」の気候条件下の台風属性値を与えた。また、温暖化に伴う台風特性の変化には未だ不明なことも多いが、「温暖化で台風属性値の時間変化量が空間的に北へ緯度で1.5°移動する」と仮定するモデル（橋本ら, 2005）で「将来」の気候条件下の台風属性値を与えた。

(2) 顕著な台風の抽出

再現期間の長い高潮偏差や潮位の極値を調べるために、本研究ではそれぞれの気候条件下における500年

1 正 会 員 修(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部海洋水理・高潮研究室長
2 フェロー 工博 九州大学大学院教授工学研究院環境都市部門
3 水修 (財)日本気象協会首都圏支社調査部

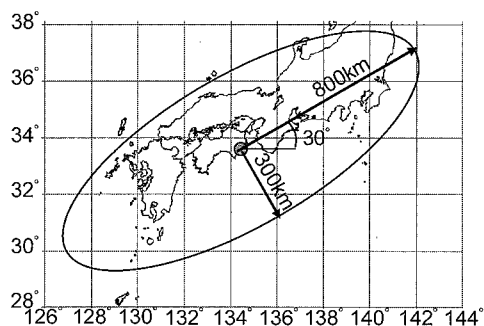


図-1 台風の抽出範囲

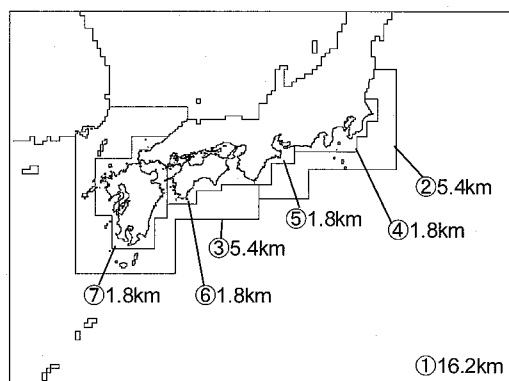


図-2 高潮推算の計算領域と格子間隔

分の台風を用いることにした。そして、その中から、九州から関東に至る太平洋沿岸に顕著な高潮を発生させる可能性のあるものとして、図-1 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 800 km、これと直交方向に短半径 300 km）を中心気圧が 970 hPa 以下で通過するものを抽出した。その結果、現在の気候条件下で 1,301 個、将来の気候条件下で 1,399 個の台風が抽出された。

(3) 高潮推算

前節(2)で与えた台風属性値をもとに、台風の海面気圧の分布を Myers の式で与え、海上風を傾度風と場の風の成分をベクトル合成する経験的力学モデルで与えた。その風速低減係数には、橋本ら (2003) と同じ 0.65 を用いた。

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で海水の流れを計算した。ここで線形長波としたのは、非線形長波による推算値との差が小さく、演算時間を短縮するためである。また、天文潮位は平均海面で一定とし、高潮偏差分だけを計算する方法をとった。計算領域は、図-2 に示すように、九州から関東に至る太平洋沿岸を 1.8 km 間隔の格子で表現したものである。八代海の北部のような地形の非常

に込み入った海域までは十分に表現していない。また、地形性碎波による水位上昇は考慮していない。

3. 最大の高潮偏差とそれを発生させる台風

(1) 500 年間の台風で最大の高潮偏差

図-3 は、現在の気候条件下の 500 年間の台風で得られた最大の高潮偏差である。いわゆる「ワーストケース（あるいは可能最大）の高潮偏差」の定義については今後も議論が必要であろうが、ここに示した値はそれに匹敵するものであると思われる。

東京湾、伊勢湾、大阪湾、播磨灘、燧灘・備後灘、広島湾、有明海、八代海、鹿児島湾では、台風がその内湾の西側を北上することで、その海域の北端部で高潮が顕著になりやすい。また、周防灘では、台風が南方に位置するときに海水が東風による吹き寄せを受け、さらに最接近時には吸い上げも受けて、その西端部では高潮が顕著となりやすい。なお、河合ら (2001) は、伊勢湾台風級のモデル台風を経度で 0.25° 間隔の平行なコースに走らせ、日本各地に発生し得る最大の高潮偏差を求めているが、その結果とも似た分布が得られている。

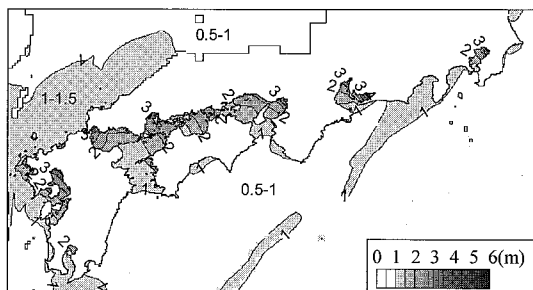


図-3 現在の気候条件下で 500 年間最大の高潮偏差の分布

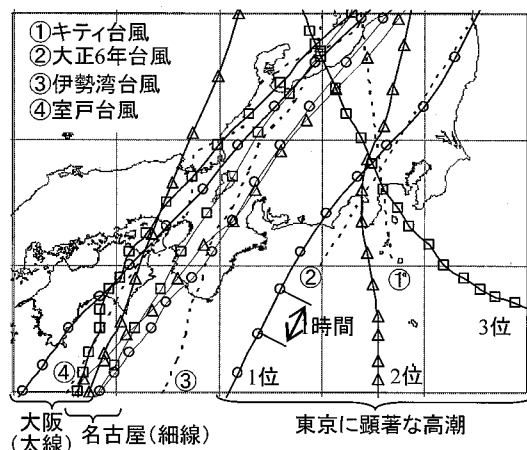


図-4 東京、名古屋、大阪に3位までの高潮偏差を起こす台風

(2) 最大の高潮偏差を発生させる台風

図-4の実線は、現在の気候条件下の台風のうち、東京、名古屋、大阪に3位までの高潮偏差をもたらした台風のコースを示す。名古屋に対しては、1位から3位までが何れも、紀伊半島に上陸して伊勢湾と琵琶湖の間を北東進する、伊勢湾台風に似たコースである。大阪に対しては、淡路島付近を北東進する、室戸台風に似たコースである。一方、東京に対しては、何れも東京湾の西側を通過するものであるが、1位は大正6年台風のように北東進、2位はキティ台風のように北進、3位は北北西進と、様々な方向のものが含まれている。

4. 高潮偏差と潮位の極値分布

(1) 高潮偏差の極値分布

各計算格子点で得られた500年間の高潮偏差に対して極値統計解析を行った結果を図-5に示す。あてはめに用いた極値分布は、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($k=0.75, 1, 1.4, 2$)であり、これらの中からMIR指標(合田・小舟, 1989)で最適な分布を選択した。その結果、ほとんどの計算格子でWeibull分布の $k=1.4$ または 2.0 が選択され、周防灘の西部ではGumbel分布、鹿児島湾の北部では極値Ⅱ型分布の $k=10$ も選択された。

この図から、比較的身近な10年確率の高潮偏差は、太平洋沿岸のほぼ全ての地点で0.5m以上であり、東京湾、伊勢湾、瀬戸内海、有明海、八代海の奥部では1m以上である。100年確率の高潮偏差では、これら高潮の顕著な内湾のほぼ全域で1m以上となり、伊勢湾、大阪湾、有明海の奥部では3mを超える値が得られている。さらに、1,000年確率の高潮偏差では、太平洋沿岸のほぼ全ての地点で1m以上となり、内湾の奥部では4mを超える値も得られた。なお、本研究で得た瀬戸内海の値は、瀬戸内海のみを対象とした河合ら(2006)と概ね同じである。

図-6は、代表的な地点について最大高潮偏差の極値分布を示す。東京、名古屋、大阪では、計画高潮位を含む高潮偏差分としてそれぞれ3m, 3.5m, 3m程度を想定している(東京では伊勢湾台風級の台風による高潮偏差2.1mに余裕がとられている)。その再現期間は名古屋と大阪では100年程度、東京では1,000年程度と推定される。また、これら三大湾とともに有明海や広島湾も、大きな高潮偏差が発生しやすい海域であることが分かる。

(2) 潮位の極値分布

瀬戸内海の西部や九州西岸には天文潮差が4m近くに達する海域もあり、そこでは干潮時に最大級の高潮偏

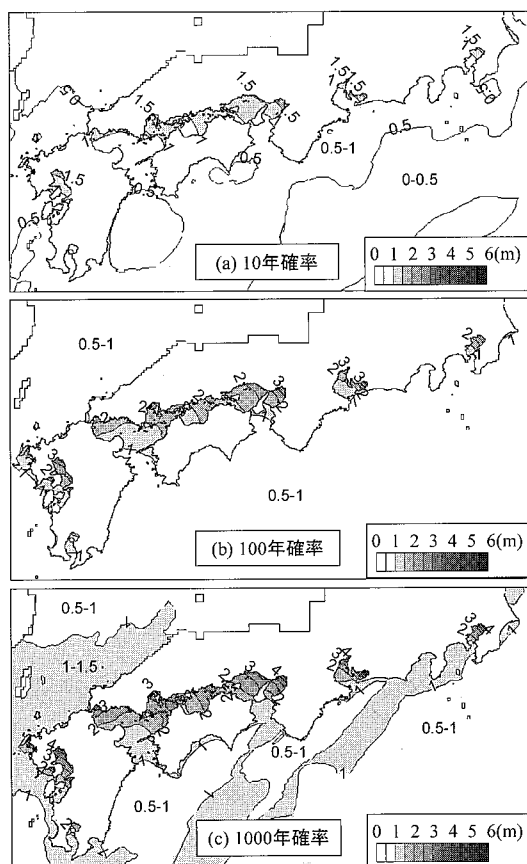


図-5 現在の気候条件下で10~1,000年確率の高潮偏差の分布

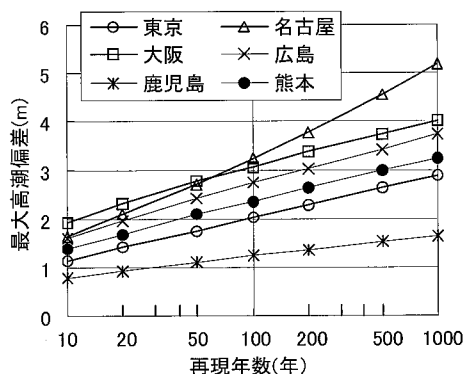


図-6 最大高潮偏差の極値分布

差が生じるよりも、満潮時に比較的大きな高潮偏差が生じることの方が危険である。そこで、高潮推算によって得た高潮偏差の時系列と、潮汐調和定数から算出した天文潮位の時系列を線形的に足し合わせて、潮位の時系列を作り、その最高潮位の極値についても整理した。

図-7は、図-6と同じ地点に対し、CDLを基準とする最高潮位の極値分布を示す。東京、名古屋、大阪の計画

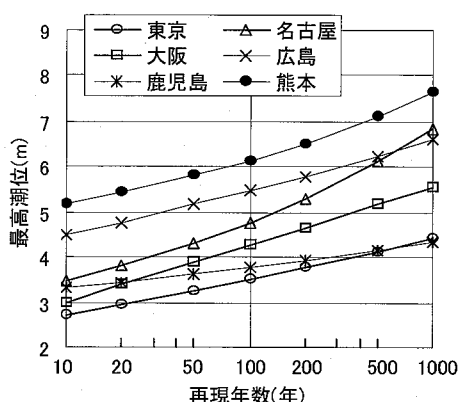


図-7 最高潮位の極値分布

高潮位はそれぞれ 5.7m, 5.9m, 4.8m 程度であり、その再現年数は名古屋と大阪では数百年であり、東京では千年を大きく上回るものと推定される。

5. 高潮の継続時間特性

(1) 高潮偏差の継続時間

高潮対策施設の性能照査において、高潮の継続時間をどのように位置づけ、確率的な照査モデルにどのような統計値として組み込むかについては、まだ議論が尽くされていない。高潮偏差の経時変化を三角形にあてはめて、その底辺の長さを高潮の継続時間と定義する方法（河合ら, 2002）もあるが、本研究では河合ら（2006）にならない、「高潮偏差が最大値の 0.95 倍以上である時間」という定義で継続時間の特性を調べてみた。

東京、名古屋、大阪を例に、その結果を図-8 に示す。名古屋で 3m 以上の高潮偏差が生じたときの継続時間は 1 時間程度と短い、大阪では 2 時間を超えるものもある。また、東京は東京湾の湾奥ではないため、名古屋や大阪ほど大きな高潮偏差は生じにくい、2m 以上の高潮偏差が生じたときの継続時間は大阪と同様に長い。つまり、大阪や東京の高潮偏差のピークは名古屋に比べて緩やかなものになっている。このような継続時間の違いは、台風の進行速度に加え、湾の形状にも起因したものであると考えられる。

(2) 高い潮位の継続時間

高い潮位の継続時間も「潮位が（最高潮位 - 0.5m）以上である時間」と定義し、図-8 と同じ地点に対して整理した結果を図-9 に示す。何れの地点でも、全体的には最高潮位が高いほど継続時間は短くなる傾向がある。名古屋と大阪では 10 位までが概ね 4 時間以下である。一方、東京では、名古屋や大阪ほど高い最高潮位は出現しにくい、高潮偏差のピークが緩やかであるため、高い潮位の継続時間も長くなりやすい。

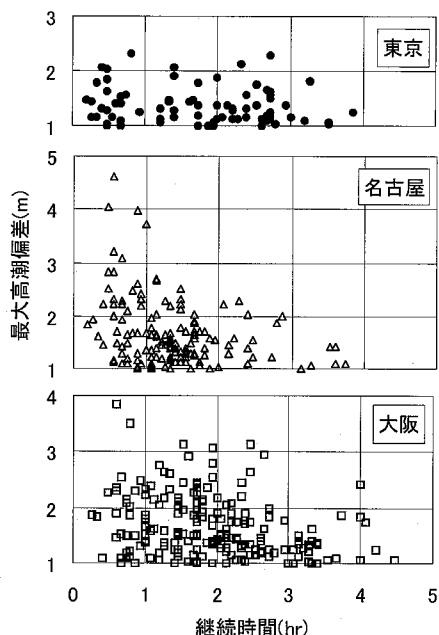


図-8 高潮偏差の継続時間の分布

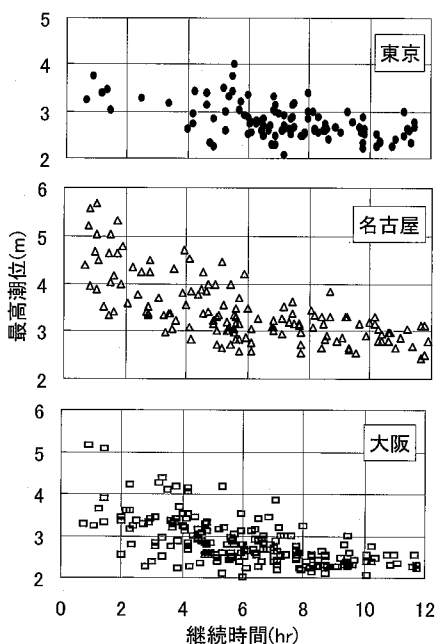


図-9 最高潮位と継続時間の関係

6. 温暖化による高潮の出現特性の変化

将来の気候条件下における、500 年間で最大の高潮偏差を図-10 に、100 年確率の高潮偏差を図-11 に示す。それぞれ、現在の図-3、図-5(b)に対応する図である。

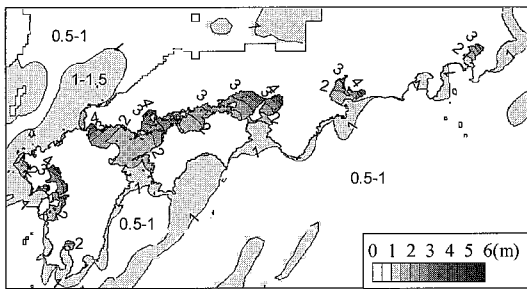


図-10 将来の気候条件下で500年間最大の高潮偏差の分布

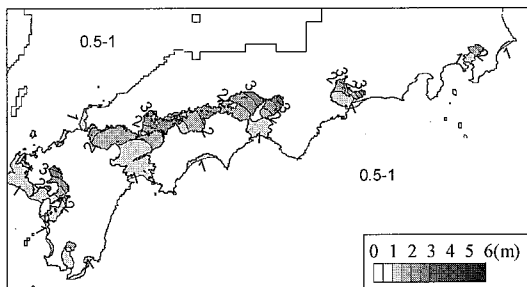


図-11 将来の気候条件下で100年確率の高潮偏差の分布

将来の気候条件下では、500年間の最大値でも100年確率値でも、特に九州西岸や瀬戸内海において、現在より大きな高潮偏差が得られた。ただし、その増加量はこれらの海域で一律ではなく、大阪湾の奥など現在の気候条件下で既に高潮が顕著な海域で大きい。100年確率の高潮偏差で0.5m以上増加しているところもある。本研究で用いた確率台風モデルは、西日本で将来の台風を中心気圧を現在より全体的に低く与えるものであり(橋本ら, 2005), この確率台風モデルの特性に対応した結果といえる。もしこのような高潮偏差の増大と数十cmの平均海面上昇が生じれば、図-6で再現年数が数百年と評価された潮位も数十年に減少する可能性がある。

その一方で、東日本では、将来の高潮偏差が現在とほぼ同じか、やや小さな値が得られたところもある。本研究で用いた確率台風モデルの仮定がどれくらい妥当であるかについては、今後の気候変動研究の進展を待たざるを得ないが、その際には「台風強化が日本の全域で生じるか」という観点でも注意深い解析が必要であろう。

7. ま と め

本研究では、確率台風モデルで与えた台風に対して、九州から関東に至る太平洋沿岸(瀬戸内海を含む)の高

潮を推算し、その極値や継続時間の特性を調べた。得られた主要な結果は以下の通りである。

- ① 現在の気候条件下でも想定外の高潮偏差や潮位が発生する可能性がある。三大湾の計画高潮位の再現年数は数百年またはそれ以上と推定される。
- ② 高潮の継続時間には湾による違いもあるが、大きな高潮偏差、高い潮位ほど短くなる傾向がある。
- ③ 将来の台風特性の変化に伴って高潮偏差の極値が増減すると推測されるが、その変化には海域差があるものと考えられる。

これらの瀬戸内海に対する結果は河合ら(2006)が示しているが、本研究では①と②が東京湾や伊勢湾にも共通することを示し、③については高潮偏差の極値があらゆる海域で増加するとは限らない可能性を示した。

今後は、確率台風モデルを適用する期間を長くし、海上風の推算精度や高潮推算の空間解像度を高めることで、高潮の極値や継続時間の推定精度を改善して行きたい。その一方で、高潮対策施設の性能設計における継続時間の扱い方についての議論も深めたい。また、高波や河川洪水との同時生起性にも目を向けて行きたい。

参 考 文 献

- 加藤史訓・鳥居謙一・柴木秀之・鈴木勝之(2003): 確率的台風モデルを用いた潮位と越波量の確率評価, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 291-295.
- 河合弘泰・竹村慎治・山城賢・柴木秀之・平石哲也(2001): 我が国沿岸の想定高潮偏差と湾形状による増幅特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 301-305.
- 河合弘泰・竹村慎治・原信彦(2002): 東京湾における台風による高潮と高波の同時性と継続時間特性, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 251-255.
- 河合弘泰・橋本典明・松浦邦明(2006): 確率台風モデルを用いた地球温暖化後の瀬戸内海における高潮の出現確率分布の推定, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1271-1275.
- 合田良実・小舟浩治(1989): 波浪の極値統計における分布関数の棄却基準, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 135-139.
- 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.
- 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.
- 山口正隆・畑田佳男・野中浩一・大福 学・小出健太郎(2002): 瀬戸内海西部海域における高潮・高波の極値の推定, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 256-260.