

有明海における温暖化した将来の高潮の 出現特性に関する研究

POSSIBLE CHANGE IN OCCURRENCE PROBABILITY OF STORM SURGE IN ARIAKE SEA DUE TO GLOBAL WARMING

山城 賢¹・橋本典明²・河合弘泰³・麻生紀子⁴・荒木健人⁴
Masaru YAMASHIRO, Noriaki HASHIMOTO, Hiroyasu KAWAI, Noriko ASOU
and Taketo ARAKI

¹正会員 博(工) 九州大学大学院助教 工学研究院環境都市部門
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

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
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

³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
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

To investigate some possible changes in occurrence probability of storm surge due to global warming in Ariake Sea, many numerical computations for storm surges were carried out. First, three different climate conditions were assumed in the computations, i.e., the present climate condition and two different future possible climate conditions under global warming used in Hashimoto, et.al. (2005). In each climate condition, a lot of various typhoon data for 500 years were generated with "a stochastic typhoon model" by using the Monte Carlo simulation. Next, storm surges in Ariake Sea were computed for many typhoon data. And, return periods of storm surge and tide on three climate conditions were obtained by extreme value analysis. Comparative investigation of the return periods of storm surges and tide among three climate conditions shows the possibility that large storm surge and large tide would be generated more frequently in the future due to global warming.

Key Words : storm surge, Ariake Sea, global warming, stochastic typhoon model, return period

1. はじめに

高潮の危険性が高い海域である三大湾や瀬戸内海、有明海などでは、これまで積極的に堤防の整備や浸水想定区域図の作成等の高潮対策が進められてきた。ただし、一般的な高潮の検討では、既往最大の高潮を生じた台風、あるいは、伊勢湾台風など甚大な被害を生じた台風が当該地を通過することを想定するといった、過去の記録に基づく検討がほとんどであり、地球温暖化による将来の気象・海象条件の変化を考慮した高潮対策は行われていないと思われる。地球温暖化の将来予測には未だ不確かな部分があるものの、温暖化により平均海面が上昇し、台風が強大化すれば、大きな高潮に見舞われる頻度が増すことは容易に想像される。したがって、現在考えられる可能性の範囲において将来の高潮出現特性を把握しておくことは、今後の高潮防災を検討するうえで十分に意味がある。

このような観点から、地球温暖化の影響を考慮した将来の高潮について検討された例として、例えば、桐ら¹⁾は有明海を対象に地球温暖化により台風の規模(気圧深度)が15%大きくなると仮定し、有明海沿岸で高潮偏差が20cm~55cm増大すると予測している。また、河合ら²⁾は、橋本ら³⁾による確率台風モデルを用いて、現在および温暖化した将来の気候条件について、それぞれ500年分の模擬台風を作成して、この台風データベースを用いて瀬戸内海における将来の高潮偏差と潮位の出現確率について検討し、地球温暖化で大きな高潮偏差や高い潮位が発生しやすくなること、その将来的な変化には海域によって差があることなどを示した。

本研究では、河合ら²⁾の検討手法を、潮差が大きくこれまでも顕著な高潮が幾度も発生している有明海(高橋ら⁴⁾、宮崎⁵⁾)に適用し、有明海における温暖化した将来の高潮の出現特性について検討した。

2. 有明海を対象にした台風データベースの作成

(1) 確率台風モデルによる台風データベース

確率台風モデルとは、過去の台風の属性値（中心位置、中心気圧、最大風速半径など）およびその時間変化量を統計解析して得られた出現確率分布や自己回帰式に基づいて、任意の期間中に発生する台風の属性値を、モンテカルロ・シミュレーションの手法を用いて模擬的に与えるものである。河合ら²⁾は、まず、橋本ら³⁾によって1951から2000年の台風に基づき構築された確率台風モデルを用いて、500年分に相当する台風データを作成し、これを現在の気候条件における台風データとした。さらに、河合ら²⁾は、温暖化の影響を考慮した台風データを作成するため、橋本ら⁶⁾により提案された、温暖化した将来を想定した確率台風モデルを使用し、現在気候の場合と同様に500年分に相当する台風データを作成した。なお、温暖化した将来における確率台風モデルは、気象庁と気象研究所がIPCCによる温暖化ガス排出シナリオのうちA2シナリオに基づいて予測した2081から2100年における気圧と風のデータ（石原ら⁷⁾）をもとに、橋本ら⁶⁾が「地球温暖化の影響により台風属性値の時間変化量の空間場が北へ緯度で1.5°、もしくは、東へ経度で1.5°移動する」と仮定し作成したものである。したがって、温暖化した将来の気候条件における確率台風モデルは2通り構築されており、台風データベースも2通りの気候条件について作成されている。

(2) 有明海を対象とした場合の台風の抽出

本研究では、河合ら²⁾が前述の方法で作成した

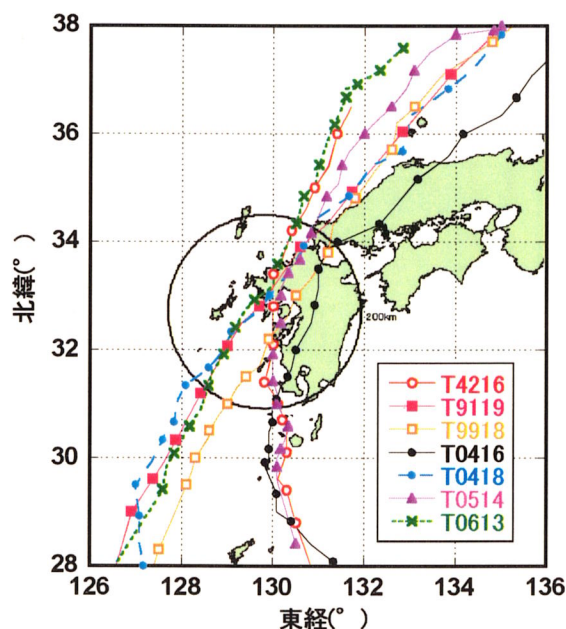


図-1 台風の抽出範囲と過去の代表的な台風の経路

500年分の台風データを利用し、有明海で高潮を生じる可能性がある台風を抽出した。抽出の条件は、図-1に示す長崎（東経129.5°，北緯32.5°）を中心に半径200kmの円を通り、中心気圧が970hPa以下である台風とした。図には、過去に有明海で高潮を引き起こした台風の経路を示しており、いずれの台風も設定した抽出範囲を通過している。以上の条件で台風を抽出した結果、現在の気候条件（以後、現在気候）で389、将来気候で北へ1.5°移動（以後、将来気候(北)）した場合で440、東へ1.5°移動（以後、将来気候(東)）した場合で395の台風が抽出された。福岡管区气象台によれば、九州における1971年から2000年の台風上陸数の平年値は1.2個であり500年分では600個となるため、各気象条件で抽出された台風の数とは500年分としては幾分少ないが、これは中心気圧にも抽出条件を設定したためと思われる。

3. 高潮推算

(1) 高潮推算モデル

抽出した全ての台風について高潮推算を実施した。高潮偏差の計算には、一般的な数値計算モデル（河合ら⁸⁾）を用いた。台風の海面気圧にはMyersの分布を仮定し、海上風は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推定した。なお、傾度風成分の推定には、台風中心付近での風速の再現性を高めるため、SGW (Super Gradient Wind) を考慮し、風速低減係数を等圧線の曲率半径によって決まる関数としている（Albena・河合⁹⁾）。また、場の風成分における風速低減係数についても同じく与えている。これらの海面気圧と海上風を外力とし、単層の線形長波方程式に基づく数値計算モデルで流れを計算した。ただし、実務で一般的に行われているように、天文潮位は一定(DL+2.0m)とし、高潮偏差のみを計算した。

計算領域は、日本列島の南半分を含む太平洋沿岸を16.2km間隔の計算格子で分割し、その内部に細かな計算格子の領域を接続させ、八代海を含め有明海の全域を1.8km間隔の計算格子で再現した。図-2に検討対象である有明海の計算領域を示す。また、計算時間間隔は6sとした。以上の方法により、今回使用したPC (Dell製 Dimension 3100C, CPU: Pentium(R) 4 3.0GHz) では、1つの台風につき、15分程度の計算時間を要した。

(2) 計算精度の検証

本計算モデルによる高潮偏差の推算精度を検証するため、図-1に示した過去の台風（4216号、9119号、9918号、0416号、0418号、0514号、0613号）について、高潮偏差を計算し観測値と比較した。比較した結果を図-3に示す。本計算モデルによる推算値は観測値に比べて、特に湾の東側に位置する

三角や熊本の付近で過大評価になる傾向がある。しかし、湾口付近の口之津や湾奥西側の大浦では比較的精度が良いといえる。また台風の違いによっても、計算精度が幾分変動している。

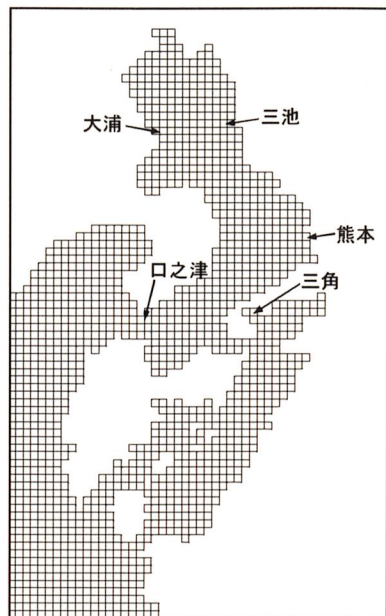


図-2 計算対象領域

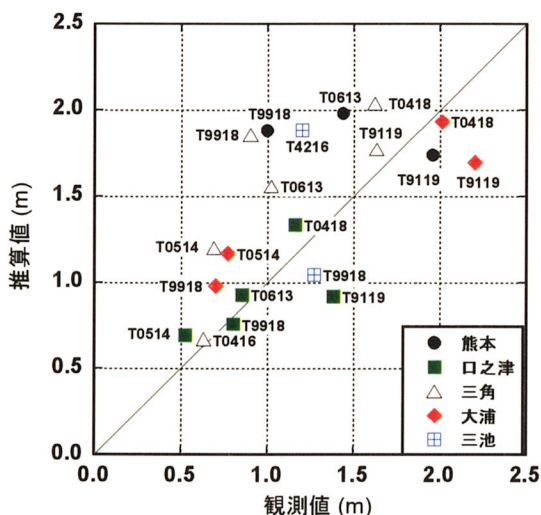


図-3 高潮偏差の計算精度

4. 高潮偏差

(1) 最大高潮偏差

図-4 は現在の気候条件における 500 年分の台風について計算した高潮偏差から得られた最大高潮偏差の分布である。図より、全体的な特徴として、湾奥であるほど高潮偏差は大きくなり、熊本や三池などの湾軸に対して東側の沿岸で高潮が大きくなるといえる。このことは、前述した本計算モデルの計算結果が、特に湾の東側の沿岸で過大評価になりやすいということも幾分影響していると思われるが、有

明海における高潮の地形的な特徴といえる。

図-5 は同様に将来の気候条件について 500 年分の台風データにより求めた最大高潮偏差と図-4 で示した現在の気候条件における最大高潮偏差との差の分布である。将来気候(東)の場合、最大高潮偏差は広い範囲で若干減少しているが、大浦などの湾奥西側の沿岸で、40cm~50cm 程度増大している。これに対し、将来気候(北)では、有明海の全域で最大高潮偏差は増大しており、特に熊本周辺の沿岸では 1m 程度増加している。

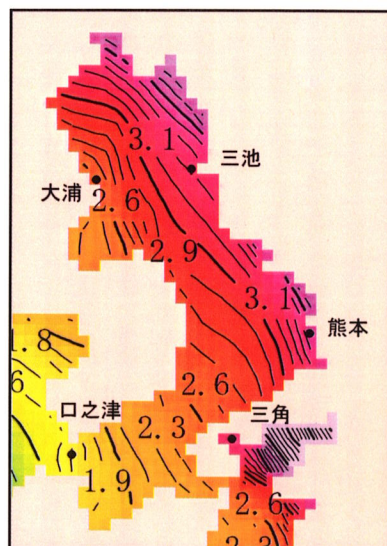


図-4 現在の気候条件における 500 年間の最大高潮偏差

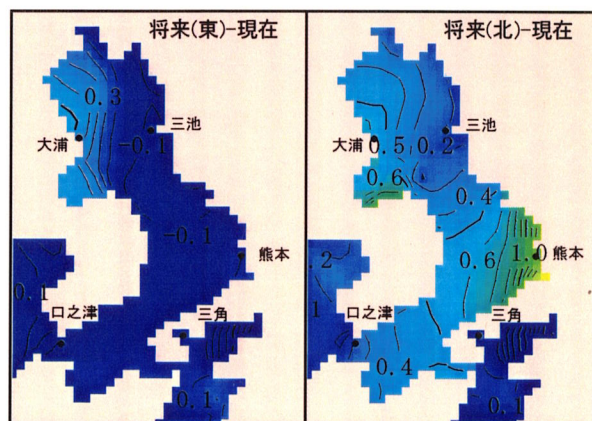


図-5 温暖化した将来と現在の最大高潮偏差の差
(左図：将来気候(東)と現在気候との差、
右図：将来気候(北)と現在気候との差)

(2) 最大高潮偏差を引き起こした台風

熊本と大浦を例に最大高潮偏差を生じた台風の経路を図-6に示す。熊本についてみると、将来気候(東)では、9918号台風と0514号台風の間を通過して有明海に近づき北北東へ進行している。一方、将来気候(北)では、西から東へ緯度線にほぼ平行に九州を

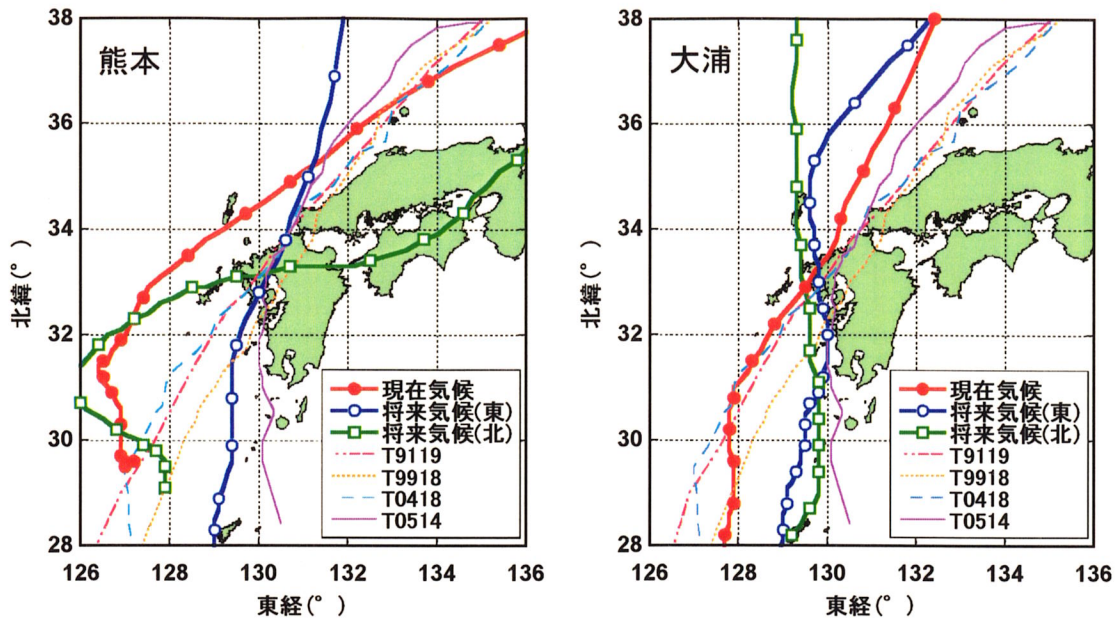


図-6 最大高潮偏差を生じた台風の経路（左図：熊本、右図：大浦）

横断する経路となっている。併せて示した過去の台風も含め、有明海に顕著な高潮を生じさせる台風が、現在気候における台風を除いて、いずれも有明海湾奥付近のほぼ同一の地点を通過していることは興味深く、有明海の北側周辺を通る台風は熊本に顕著な高潮を生じやすいと考えられる。一方、大浦に最大高潮偏差を生じた台風は、熊本の場合とは異なり、有明海の西側を北進する経路を取っている。有明海湾奥部の西側沿岸では、このように有明海の西側を北上する台風で大きな高潮が生じやすいといえる。

5. 高潮偏差と潮位の再現期間

(1) 高潮偏差の極値分布

前節で比較した最大高潮偏差は、現在および将来の気候条件について、それぞれ500年分の台風から求めたものであり、将来気候(北)の条件において熊本付近で大幅に高潮偏差が増大するという結果は、偶然に強大な台風データが作成されたという見方でもできる。そこで、各計算格子点において500年間の高潮偏差に対し極値統計解析を行い、現在気候および将来気候における高潮偏差の再現期間について比較した。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¹⁰⁾）で最適な分布を選択した。

図-7は現在気候における再現期間が10年、100年、1000年の高潮偏差の分布と、それぞれの再現期間における2通りの将来気候と現在気候との確率高潮偏差の差の分布である。現在気候では、再現期間10年

で有明海のほぼ全域で高潮偏差が1mを超え、再現期間100年では広い範囲で2mを超える。さらに、再現期間1000年では3mを超えている。将来気候(東)の場合には、再現期間10年および100年の高潮偏差は現在気候と大きくても20cm程度の変化であり、再現期間1000年では、有明海の中央部で減少し、湾奥部で増加するというように場所によって変化の仕方が異なるが、いずれにしても変化の程度は±50cmの範囲で収まっている。一方、将来気候(北)では、再現期間10年で20cm～30cm程度、100年で20cm～60cm程度、1000年では、最大で1.0m以上増加している。つまり、想定された2通りの将来の気候条件で、同じ再現期間の高潮偏差が大きく異なっている。橋本ら³⁾により構築された確率台風モデルでは、台風属性値の時間変化量の空間場が、現在に比べ北へ移動した場合には、東に移動した場合に比べ、台風の中心気圧が低くなる傾向があり、このことが図-7の結果に大きく影響したと思われる。将来の台風条件としてどちらがより妥当かという点については現時点では不明だが、将来の台風特性の変化によっては、高潮偏差が増大し、顕著な高潮が今以上に身近な脅威となる可能性がある。

(2) 天文潮位の設定

有明海は我が国で最も潮差が大きい海域であり、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の高さは大きく異なる。そこで、数値シミュレーションによって得た高潮偏差の時系列に、調和定数から求めた天文潮位の任意の時刻における時系列を重ね合わせて潮位の時系列を求め、その最高潮位の極値統計を行った。なお、平均半潮差と遅角の値には、海上保安庁¹¹⁾に掲載されているものを用いた。また、IPCCの第3次評価報告書によれば、2100年までに平均海面が9～

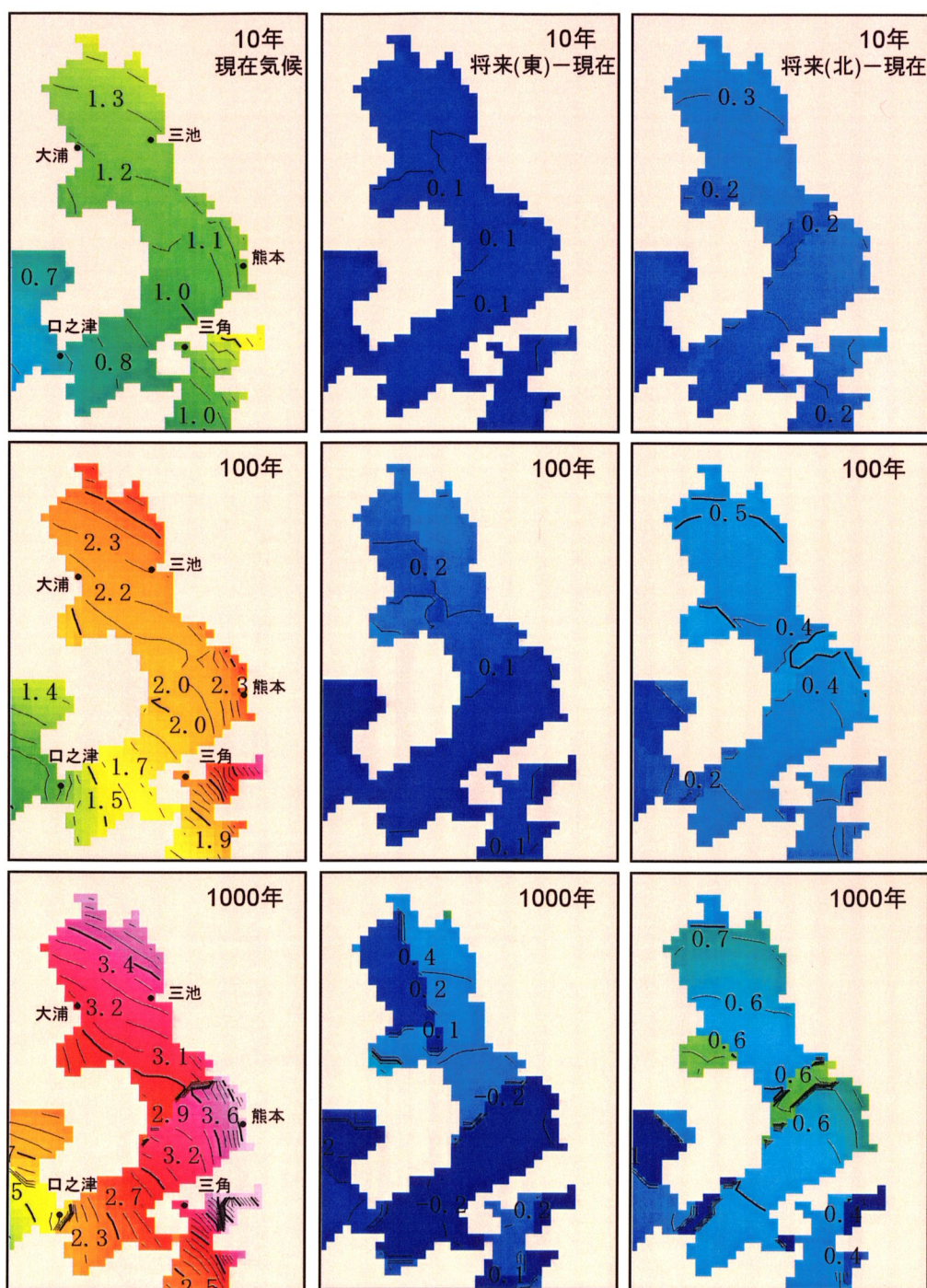


図-7 現在の気候条件における確率高潮偏差と将来気候における確率高潮偏差の変化

88cm 上昇すると予測されていることから、将来気候では地球温暖化による水位上昇として 0.5m を加えた。

(3) 潮位の極値統計

図-8 に有明海の 4 地点（口之津、熊本、三池、大浦）について高潮偏差と潮位の再現年数を示す。なお、潮位は最低水面 CDL を基準としている。場所により再現期間の変化は異なり、熊本では将来気候（東）において、再現年数が 200 年を超える高潮偏差

が、現在気候を下回っている。潮位はいずれの地点においても、現在気候に比べ将来気候の方が高くなっており、2 通りの将来気候での差異は小さい。現在気候における 100 年確率潮位は、湾口部の口之津では約 25 年にまで縮み、大浦や熊本、三池においても、約 30 年から 40 年と半分以下になる。再現年数の変化の程度は場所によって多少異なり、そもそも高潮が小さい湾口部ほど変化が大きいようである。

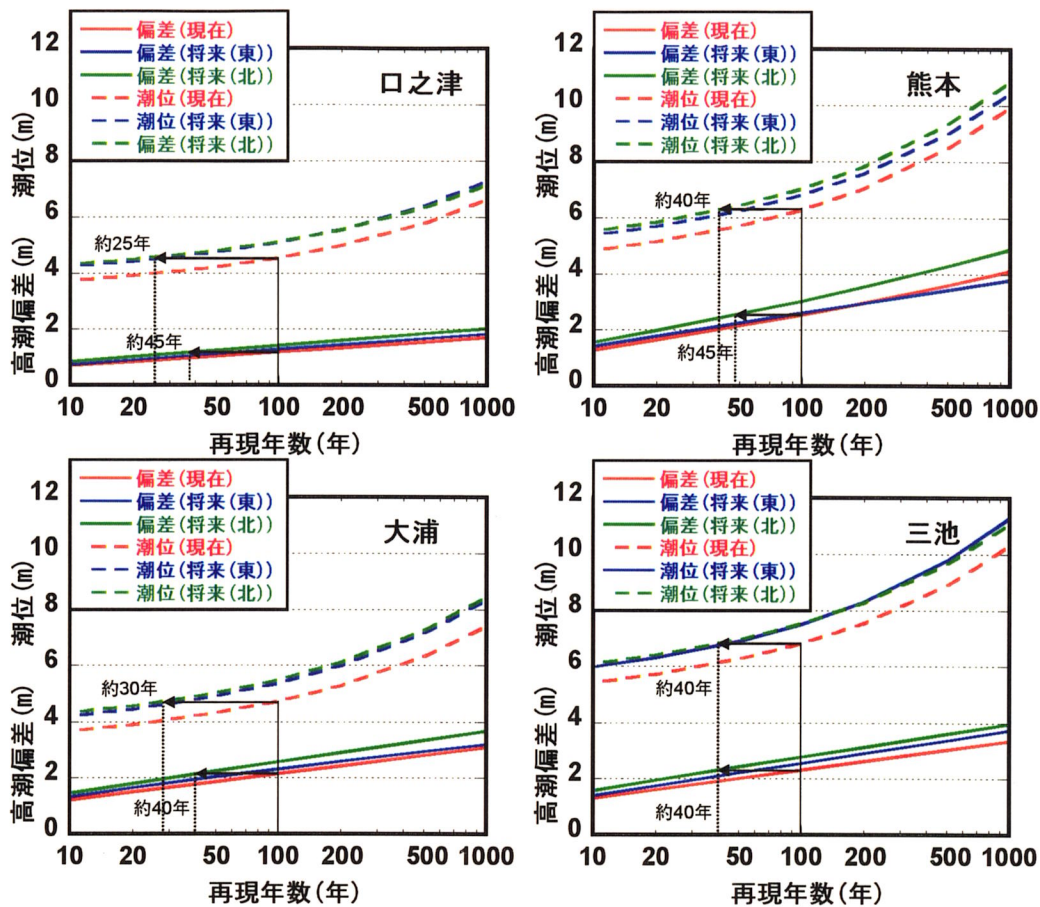


図-8 有明海沿岸における高潮偏差と潮位の再現期間

6. あとがき

ある仮定のもとで温暖化した将来の台風を想定し、それをもとに有明海における将来の高潮の出現特性について検討するため、確率台風モデルによる台風データベースを基に高潮推算を行い、現在と温暖化した将来の高潮の出現特性について調べた。その結果、温暖化により変化した将来の台風特性によっては、場所により程度は異なるが、有明海の全域で最大高潮偏差が増大し、高潮偏差や潮位の再現期間が大幅に短くなる可能性があることを示した。今回の検討では、計算量と計算時間の兼ね合いから、単純なモデルを用いて高潮の計算を行っているため、高潮偏差の計算精度については向上の余地がある。ただし、将来の高潮リスクを検討するうえで最も重要なことは、海面上昇量や台風の特性等の将来における気象海象条件を的確に想定することであり、今後、最新の知見を取り入れつつ、検討を続けていく必要がある。

参考文献

- 1) 桐 博英, 丹治 肇, 中矢哲郎: 地球温暖化後の台風に伴う高潮潮位偏差の変化, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 241-245, 2004.
- 2) 河合弘泰, 橋本典明, 松浦邦明: 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, 2006.
- 3) 橋本典明, 川口浩二, 河合弘泰, 松浦邦明, 市川雅史: 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, 2003.
 - 4) 高橋 博, 竹田 厚, 谷本勝利, 都司嘉宣, 磯崎一郎: 沿岸災害の予知と防災 一津波・高潮にどう備えるか-, pp. 190, 白亜書房, 1988.
 - 5) 宮崎正衛: 高潮の研究 その実例とメカニズム, pp. 29-60, 成山堂書店, 2003.
 - 6) 橋本典明, 河合弘泰, 松浦邦明: 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, 2005.
 - 7) 石原幸司, 栗原和夫, 和田一範, 村瀬勝彦, 富沢洋介: 洪水・溺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 年秋季大会講演予稿集, pp. 145, 2004.
 - 8) 河合弘泰, 本多和彦, 富田孝史, 柿沼太郎: 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., 2005.
 - 9) Albena Dimitrova Veltheva, 河合弘泰: 台風の気圧分布の歪みと超傾度風を考慮した高潮推算, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 241-245, 2002.
 - 10) 合田良実, 小舟浩治: 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, 1989.
 - 11) 海上保安庁: 日本沿岸潮汐調和定数表, 書誌第 742 号, 267p., 1992.