

高潮対策施設のアセットマネジメントのための 海象外力に関する考察

DISCUSSION ON MARINE FORCES FOR STORM SURGE DEFENSE ASSET MANEGEMNET

河合弘泰¹
Hiroyasu KAWAI

¹正会員 修(工) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

Long storm surge defense has been constructed with the design storm water level considering the storm surge of Typhoon Vera in 1959 or the highest tide record. The return period of the design storm water level is still unknown and may vary with future change in mean sea level and typhoon climatology. This paper, therefore, begins with the necessity of probabilistic evaluation of the design storm water level, and then estimates the return period by using a stochastic typhoon model. The result shows that the return period is hundreds years or more for Japanese three major ports. As asset management requires future probability density distribution of marine forces, this paper observes the past trend in marine forces and conducts sensitivity analysis on the effect of future typhoon climatology change on extreme storm water levels. Finally, this paper discusses on performance evaluation with future marine forces.

Key Words : *Design storm water level, return period, storm surge defense, asset management, storm surge, stochastic typhoon model, climate change*

1. はじめに

現在供用中の高潮対策施設には、伊勢湾台風を契機に整備され、それから半世紀近く経つ今では老朽化で所期の性能を発揮できないものもある。今後地球温暖化で平均海面が上昇し、台風が強大化すれば、その追い打ちとなる。高潮対策施設が将来も所期の防護性能を維持するためには、海象外力の将来の変動を見越した維持補修や改良が必要だが、現実問題として潤沢な予算の確保は非常に厳しい。したがって「限られた予算でいかに高潮対策施設としての効果を発揮させるか」を考えるべきである。このようなアセットマネジメントでは、維持補修や改良にかかる予算と被害の期待額の議論が不可欠であり、そのためにはまず、現在の海象外力と施設の耐力の両方を確率分布として把握する必要がある。海象外力については、伊勢湾台風を契機に定めた確「定」論的な設計条件の確「率」的な意味づけがその第一歩であり、その将来予測も避けては通れないだろう。

そこで本論文ではまず、アセットマネジメントの観点から、伊勢湾台風級の高潮偏差や既往最高潮位に基づく現行の計画高潮位の課題を整理する。その最大の課題は確率的な意味づけであり、それを解決しようとするツールの一つに確率台風モデルがある。本論文では、確率台風モデルの概念と、それによって解決できること、今後の技術的課題について記す

とともに、潮位の極値分布や計画高潮位の再現期間の試算例を示す。さらに、アセットマネジメントには将来の海象外力が必要である。その長期変動を探るために、過去の波浪や潮位の経年変化を観測値から解析する一方で、地球温暖化に伴う台風の出現特性の変化が潮位の出現特性に及ぼす影響を試算し、高潮対策施設の性能照査についても考察する。

2. 高潮対策施設の計画高潮位とその課題

(1) 伊勢湾台風を契機に定められた計画高潮位

東京湾、伊勢湾、瀬戸内海など顕著な高潮が発生する内湾では一般に、

①朔望平均満潮位などの満潮位に、伊勢湾台風級のモデル台風で生じる高潮偏差を加えた潮位、

②既往最高の潮位、

の何れかで高潮対策施設の計画高潮位を定めてきた。

例えば東京港では、伊勢湾台風級のモデル台風が東京湾の西側を通過した場合の高潮偏差 2.08m に余裕を加えた 3m を計画偏差とし、朔望平均満潮位と合わせた潮位を計画高潮位としてきた¹⁾。名古屋港では伊勢湾台風による高潮偏差 3.5m と台風期平均満潮位とを合わせて、大阪港でも伊勢湾台風級のモデル台風が室戸台風のコースを通った場合の高潮偏差 3.0m と朔望平均満潮位とを合わせて、それぞれ

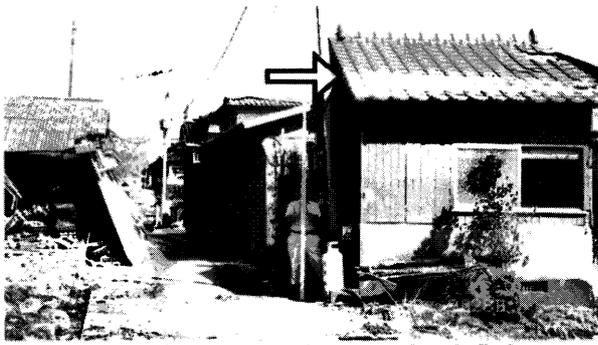


図-1 高潮氾濫で屋根まで浸水した住宅

計画高潮位としてきた。

(2) 近年になって頻発化する？高潮災害

1959年の伊勢湾台風以来、日本各地で高潮対策施設が整備され、伊勢湾台風級の台風の上陸もなかったため、大規模な高潮災害には遭わなかった。ところが、40年たった1999年、台風18号は八代海や瀬戸内海西部に顕著な高潮・高波を大潮の満潮時に発生させ、全国的にみても伊勢湾台風以来の大規模な沿岸災害をもたらした^{2),3)}。図-1は、高潮が堤防を越えて住宅地に流れ込んだ跡である。また、2004年にも、台風16号の高潮で高松市や倉敷市の広範囲が浸水し、瀬戸内海中部では既往最高潮位が更新されるところもあった。

(3) 現行の計画高潮位に関する課題

a) 確率的な評価の必要性

伊勢湾台風級の高潮偏差でさえ滅多に起きない事象である。ましてや、それが満潮位と同時生起する計画高潮位はもっと稀である。既往最高潮位に基づく計画高潮位も「どれくらいの期間の最高潮位であるか」が気にはなるものの、少なくとも頻繁に起きる事象ではない。我々は普段このように安心しているが、(2)で述べた史実が示唆するように、潮位が計画高潮位を超えることはあり得る。したがって、

①計画高潮位を超える確率がどれくらいか、

②その潮位で高潮対策施設がどう破壊するか、という検討が必要である。海象外力の確率的な評価は、アセットマネジメントに不可欠であり、国土交通省の委員会等でも重要性は指摘されている^{4),5)}。

b) 検潮記録にある限界と一つの代替策

計画高潮位の再現期間を推定する方法で、まず考えられるのが、検潮記録の極値統計解析である。ところが、ごく一部の地点を除くと、潮位観測の歴史はまだ短い。故障やメンテナンス、古い記録の喪失など、様々な理由で、あらゆる顕著な高潮を網羅しているとは限らない。そのため、数百年のオーダーあるいはそれ以上の再現期間の議論は一般に難しい。

この問題を解決しようとする一つの方法に「確率台風モデル」がある。確率台風モデルとは、過去の台風と同じ出現確率分布を満たすように、様々なコースや強度の台風をモンテカルロ・シミュレーションで模擬的に発生させるものである。確率台風

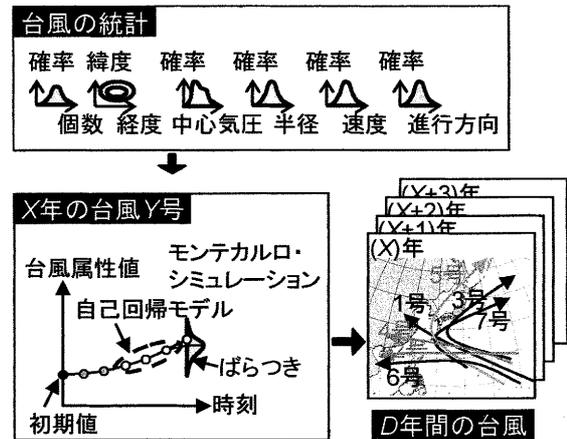


図-2 確率台風モデルの概念

モデルで数百年あるいはそれ以上の長期間の台風を与え、各台風に対する高潮を計算することで、長期の潮位データを人工的に作り出すことができる。その詳細については3.で述べる。

c) 気候変動の危惧

IPCC第4次報告書⁶⁾には、地球温暖化に伴う平均海面の上昇や熱帯低気圧の強化の可能性が記されている。気象研究所・気象庁の気候変動シミュレーションでは「台風の個数は、全体的に減るが、強い台風に限ると増加する」という結果も得られている⁷⁾。これらが現実のものとなれば、顕著な高潮や大規模な沿岸災害の頻度も増加する。

これまで高潮対策施設は、過去の歴史的な台風や高潮をよりどころに設計してきたが、そもそもアセットマネジメントは将来を見通すものである。残念ながら現在の技術では、設計にそのまま使えるほど信頼のおける将来予測は難しい。しかし、確率台風モデルに将来の台風特性の変化の仮定を導入し、計画高潮位の再現期間の変化を試算する、感度分析なら可能である。これについては5.で述べる。

3. 確率台風モデルを用いたシミュレーションによる計画高潮位の確率的な意味づけ

(1) 確率台風モデルの概念

確率台風モデルとは、図-2に示すように、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）を統計処理し、得られた出現確率分布に基づいて、様々なコースや強度の台風をモンテカルロ法で与えるものである。風速、波浪、高潮の極値の推定など⁸⁾⁻¹¹⁾、既に幅広く使われている。

本論文でとりあげる確率台風モデル^{12),13)}は、各年の台風の発生個数をポアソン分布で与える。個々の台風では、位置（緯度、経度）の初期値（発生位置）を過去の累積度数分布に従う乱数で与え、その後の属性値の時間変化量はその位置での平均値と偏差の和で与える。5つの季節（6～7月、8月、9月、10月、その他）に分け、属性値の時間変化量の偏差を自己回帰モデルで与える、という特徴がある。

(2) 確率台風モデルの可能性と今後の技術的課題

a) 確率台風モデル自体

これまで計画高潮位の設定や沿岸部の危険度評価では、伊勢湾台風級のモデル台風が、既往台風のコースやそれを東西に平行移動させたコースを通ると仮定してきた¹⁴⁾。そのとき、台風が各コースを通る確率が与えられるわけではなく、得られた高潮の再現期間も分からない。また、そもそも、伊勢湾台風より強い台風が、より危険なコースを通る可能性もあるため、最悪の高潮でもない。ところが、確率台風モデルで数百年間またはそれ以上の期間に現れる台風を与え、それぞれの高潮を計算すれば、任意の再現期間の高潮偏差も、現行の計画高潮位の再現期間も推定できる。つまり、確率台風モデルは、台風のコースを平面的に、台風の強度も伊勢湾台風を超えるところまで、統計に基づいて補間できる。

確率台風モデルの構築では一般に、1951年以降の気象庁ベストトラック解析値を適切な確率分布にあてはめる。そのため、過去に頻繁に現れたタイプの台風の表現は得意であるが、特異なものや、過去にない気象のメカニズムを伴うものは難しい。伊勢湾台風を大幅に上回る強度では、過去のデータが少なく、信頼性は低くなる。台風の発達限界は気象学的に議論が尽くされておらず、いたずらに確率分布を外挿して強い台風を仮定するのも不合理だろう。

将来の台風特性に対応した確率台風モデルの構築も試みられている¹³⁾。ただし、温暖化に伴う熱帯低気圧の特性の変化には未解明なことも多い¹⁵⁾。また、これまでの気候変動シミュレーションには、計算格子が粗く、計算で得られる台風を中心気圧が観測値に比べて高めになるなど、課題があった。つまり、シミュレーションの結果を気象庁ベストトラック解析値のように直接用いることができない。そのため、現在と将来の気候に対するシミュレーション結果の相関解析を行い、それに基づいた仮定を確率台風モデルに組み込み、高潮への感度を分析してみる、というのが現状である。

b) 確率台風モデルの応用

伊勢湾台風級の台風による高潮偏差の再現期間が何らかの方法で分かっても、満潮位と同時生起する潮位の再現期間は分からない。ところが、確率台風モデルでは台風の時刻を乱数で与えるため、高潮を天文潮の大潮～小潮、満潮～干潮の様々なタイミングと組み合わせることができる。潮位とともに波浪も計算し、それをもとに護岸や防波堤に作用する波力や越波量を計算することもできる^{10), 16)}。高潮と高波の継続時間やピークの時間差^{11), 17)}も与えられることになる。さらに、河川氾濫など他の現象を同時に扱うことも理論的には可能である。

その一方で、数千個あるいはそれ以上の台風に対する計算が必須であり、台風の気圧や風、高潮の計算では簡易なモデルを使わざるを得ない。そこで、複雑な物理過程を考慮した高精度なモデルによる計算値との相関解析をあらかじめ行い、簡易なモデル

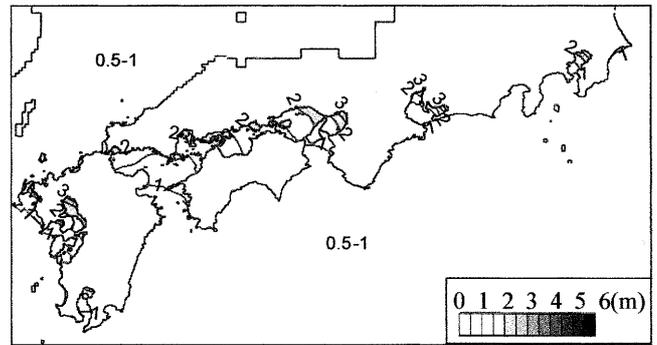


図-3 100年確率高潮偏差の平面分布¹⁸⁾

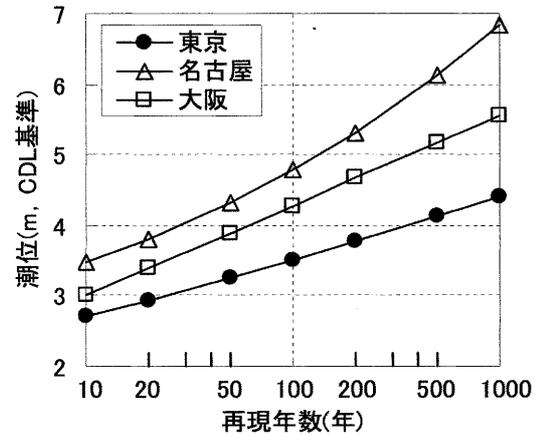


図-4 潮位の極値分布

で得られた計算値を補正するなど、工夫も必要になってくる。また、伊勢湾台風を大きく上回る強度の台風については、海面抵抗など物理過程に未解明なことも多く、その究明に対する期待は大きい。

(3) 潮位の極値分布と計画高潮位の再現期間の試算

確率台風モデルを応用すると、任意の再現期間の高潮偏差を推定できる。図-3は、100年確率の高潮偏差を推定した例であり、太平洋沿岸の内湾のほぼ全域で1m以上、伊勢湾、大阪湾、有明海の奥部では3mを超えている。この計算ではまず、確率台風モデルで500年分の台風の属性値を与えた。次に、各台風海面気圧の分布をMyersの式、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モデルで与え、これらを外力として高潮偏差を単層の線形長波モデルで計算した。このとき、天文潮位は平均海面で一定とし、地形性碎波による水位上昇は考慮していない。計算格子の間隔は九州から関東に至る太平洋沿岸で1.8kmとした。1つの台風あたりの演算時間は普及型のスタンドアロンのデスクトップパソコンで30～60分ほどである。各台風による高潮偏差を用いて、各計算格子で極値統計を行った。

さらに、各台風について、高潮推算で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とを線形的に足し合わせて、潮位の時系列を作った。その最高潮位の極値分布を求めた結果が図-4である。東京港、名古屋港、大阪港の計画高潮位はそれぞれ5.1m、5.9m、4.8m程度であり、そ

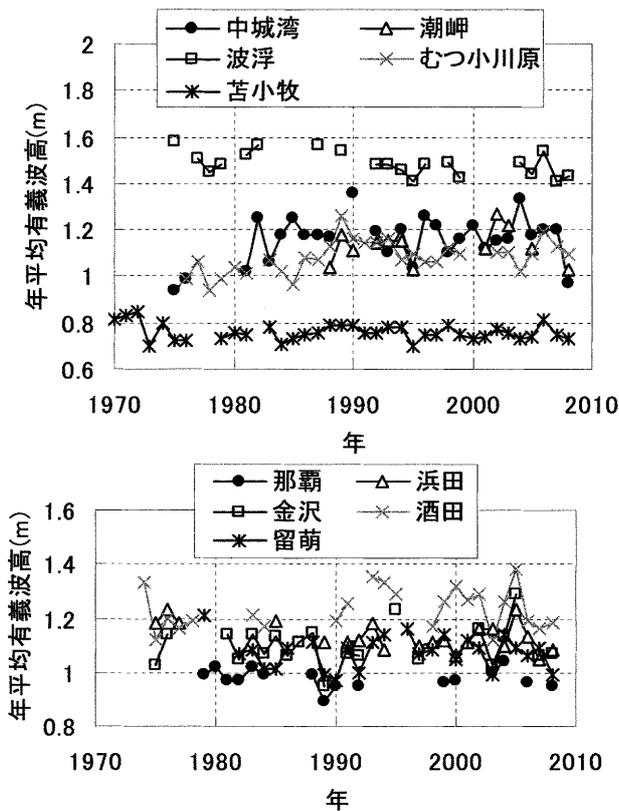


図-5 年平均有義波高の経年変化

の再現期間は名古屋港と大阪港では数百年、東京港では千年を大きく上回るものと推定される。オランダの高潮堤防は再現期間が 1,250 年または 10,000 年の潮位に対して設計されているので、東京港の再現期間はオランダに近く、名古屋港と大阪港はそれより一桁短いようである。

4. 波浪・潮位の観測値の経年変化

確率台風モデル構築時の台風統計や、波浪・潮位の極値統計では暗に、その間の出現特性が不変と仮定している。しかし実際には変動が見られ、過去の変動は将来を考える手掛かりにもなる。そこで、過去の波浪・潮位の観測値の経年変化を調べてみる。

(1) 波浪

全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHAS では 1970 年から波浪の集中処理・解析^{19),20)}を行っている。図-5は、古くから観測が継続している地点を選び、各年の平均有義波高(2007年までは確定値、2008年は速報値)を示す。全ての月で測得率が50%を超えた年のみを示している。年平均有義波高に10%程度の不規則な年変動は認められるが、むつ小川原を除き経年的に顕著な増加・減少傾向は見られない。なお、5m以上の有義波高を観測した気象擾乱の回数を年代別に比較すると、これらの地点の中では潮岬、むつ小川原、中城湾のように、近年になって高波の頻度が増加した地点もある²¹⁾。

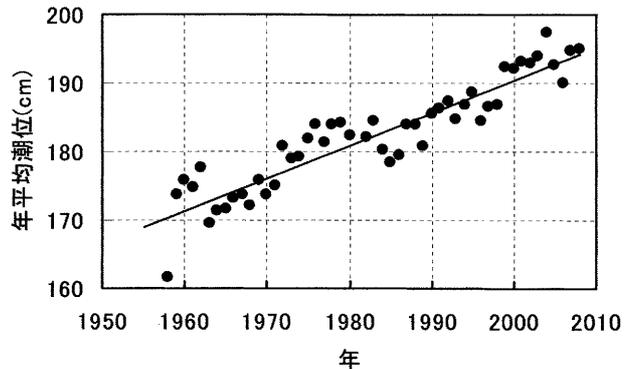


図-6 久里浜の年平均潮位の経年変化

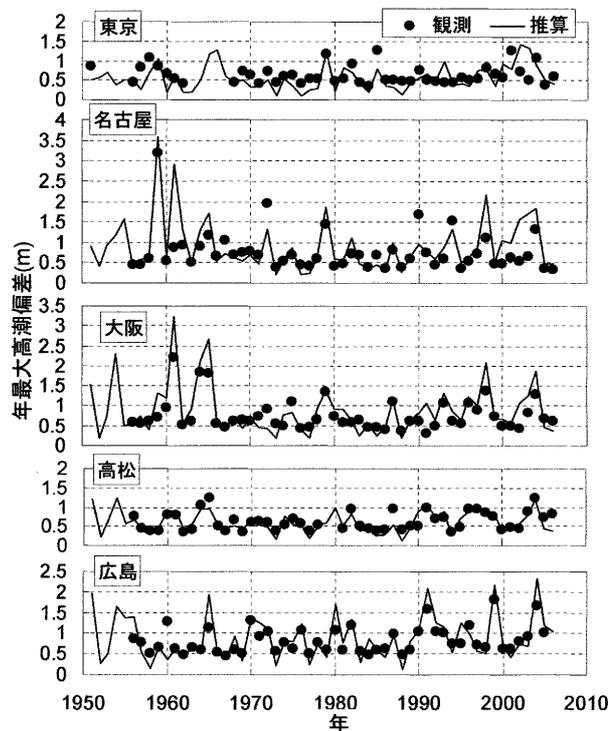


図-7 年最大高潮偏差の経年変化

ただし、長期トレンドをより厳密に議論するためには、波高計の性能や設置位置²²⁾の変遷を再確認し、波浪推算値による欠測を補完する必要があるだろう。近年では、気象客観解析データを用いて過去の波浪を推算し、波候の変動を調べることもできるようになった。この推算値との相関をとるのも良い。

(2) 潮位

港湾空港技術研究所では1958年以来、構内の検潮所で潮位を観測しており²³⁾、図-6は2008年までの年平均潮位を示す。年平均潮位は地盤に対して約4.8mm/年の速さで上昇したが、そのうち約半分が地盤沈下、残りが純粋な海面上昇によると考えられる。

図-7は、日本の代表的な地点について1951~2006年の年最大高潮偏差を示す。この図の観測値は、台風以外の気象によるものや異常潮も含む、毎時の潮位偏差の年最大値である。推算値は、全ての台風による高潮を経験的台風モデルと単層の線形長波の数値計算モデル(図-3と同じ)で推算した瞬

間最大偏差である。このようなデータの質の違いによって観測値と推算値は完全には一致していないが、1960年前後に顕著な高潮が連発し、その後しばらく静穏で、強いて言えば近年になって再び発生しやすくなっていることが分かる。したがって、過去の出現特性の第一次的な近似として、従来からよく使われてきた極値統計があるのだが、もう少し詳しい近似をするために、数年あるいはそれ以上の周期を持った変動にも目を向ける必要がある。

5. 確率台風モデルによる将来の潮位の確率分布の試算と施設の性能照査への応用

これまで将来の温暖化の影響評価では、しばしば伊勢湾台風の勢力を数割増やした場合の高潮や浸水域が試算されてきた^{24), 25)}。ここでは、確率的な評価の可能性と今後の技術的課題について述べたい。

(1) 将来の潮位の確率分布の試算

気候変動に伴う将来の台風特性の変化については、先述の通り未解明な部分も多いが、それが高潮偏差や潮位に及ぼす影響について既にいくつかの感度分析はなされている^{18), 26)}。図-8は、その例として、「台風属性値の時間変化量の平面分布が現在よりも北へ緯度で1.5°ほど移動する¹³⁾と仮定した場合の潮位の極値分布²⁶⁾を示す。将来の平均海面上昇の寄与分には約0.4mを与えている。この試算によると、大阪の計画高潮位の再現期間は、現在の気候下では数百年のオーダーであるが、将来は数十年のオーダーに縮む。また、高松の台風0416号による最高潮位も、現在は数百年のオーダーであるが、将来は身近なものになるかも知れない。まだ確率潮位の定量的な予測ができる段階ではないが、少なくとも、台風特性の変化に敏感な海域とそれほどでもない海域とがあることは分かる。例えば、台風特性変化の寄与分は、もともと顕著な高潮が発生する大阪の方が高松より大きい。

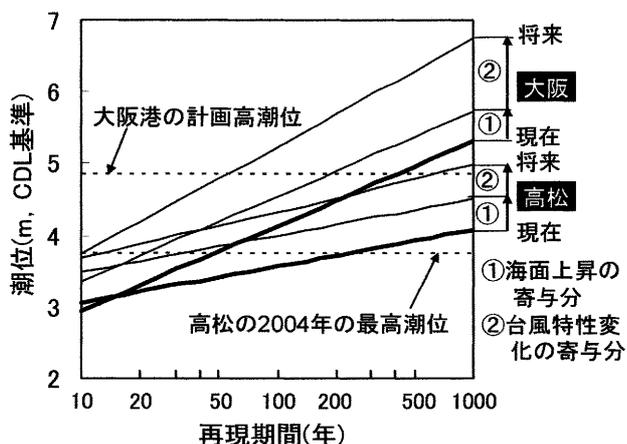


図-8 地球温暖化が潮位の極値分布に及ぼす影響

(2) 将来の海象外力を用いた施設の性能照査

港湾施設の設計には既に性能設計が導入されており、その一つが信頼性理論に基づく防波堤ケーソンの滑動確率や滑動量の推定²⁷⁾である。その推定には今のところ、過去の波浪・潮位の出現確率分布を用いている。もちろん現在の技術では難しいが、将来の波浪・潮位の確率分布を用いて、将来に向かった施設の性能照査を目指したいところである。

実際に、確率台風モデルのシミュレーション結果を用いたわけではないが、平均海面上昇や台風強大化に伴う波高・高潮偏差の増大が防波堤の滑動遭遇確率に及ぼす影響の感度解析^{28), 29)}はなされている。また最近では、IPCCの海面上昇予測に沿った性能照査³⁰⁾も試みられている。例えば、あらかじめ供用期間中の平均海面上昇量の半分を考慮した潮位に必要な安全率を満たすように設計しておく、被災は供用期間の後半に偏るが、供用期間を通じた被災確率は海面上昇がない場合と同程度に保たれる。もちろん被災が後半に偏ることが良いかについては、今後議論を詰めていく必要があるだろう。以上は防波堤を例にしたが、これらは護岸や堤防など高潮対策施設にも共通する話である。

高潮対策施設の被災確率を制御するためには、

- ①初期に大き目の断面にしておく、
- ②供用期間の途中で補強する、

の2つの選択肢がある。将来の海象条件の予測が難しい現状では、①でどれだけ海面上昇量を見込めば良いのか判断は難しい。この難問を将来に先送りした②も、実は補強が簡単にはいかない場合もある。例えば、天端を嵩上げすると、それだけ重量が増すので、マウンドの補強や新たな地盤改良が必要になることもあるだろう。供用期間の途中で技術的にも費用的にも容易に補強できる構造形式を考え出す必要がある。初期建設費、維持・補修・改良費、直接および間接被害の期待額を見積ることは、アセットマネジメントで不可欠なことである。

もちろん現在の技術では「西暦〇年から天端高を〇cm上げる」といった時間軸を明確にした計画の立案は難しいかも知れない。それでもせめて「海象特性にどれだけの変化が生じたら、どんな行動を起こすか」という戦略は立てておくべきだろう。そのためには少なくとも、現在の高潮対策施設の性能をしっかりと照査し、維持・補修・改良の方法、予算やそれに携わる人員を見積る必要がある。それが基礎資料となる。

個々の高潮対策施設ではなく、国家あるいは地方レベルの長期的なシナリオを描くならば、将来の日本の人口や経済の動向、ライフスタイルの変化も念頭におく必要が出てくる。また、この戦略を実行に移すタイミングを見極めるためにも、海象のモニタリングを継続し、数値計算モデルと結合させて面的に捉えていく必要がある。

7. おわりに

本論文では、高潮対策施設の計画高潮位にある重要な課題の一つとして確率的な評価をとりあげ、確率台風モデルを応用した潮位の極値や計画高潮位の再現期間の試算例を紹介した。高潮対策施設のアセットマネジメントには、最新の気候予測の結果の確率台風モデルへの導入、高潮対策施設の確率的な性能照査、変動し続ける海象外力への長期的な対応策など、これからも様々な技術的課題に取り組んでいく必要がある。

謝辞：本研究の一部は科研費（20360220）の助成を受けたものであり、ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) 気象庁・東京都：東京湾高潮の総合調査報告，1960.
- 2) 河合弘泰・平石哲也・丸山晴広・田中良男・古屋正之・石井伸治：八代海と周防灘における台風 9918 号の高潮・波浪災害の現地調査，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 311-315，2000.
- 3) 高橋重雄・河合弘泰・高山知司：1999 年の台風 18 号による災害と今後の高潮・高波対策について—高潮対策施設の性能照査と性能設計，土木学会誌，Vol. 85，pp. 67-70，2000.
- 4) ゼロメートル地帯の高潮対策検討会：ゼロメートル地帯の今後の高潮対策のあり方について，2006.
- 5) 交通政策審議会：「地球温暖化に起因する気候変動に対する港湾政策のあり方」答申，2009.
- 6) IPCC: Fourth Assessment Report, Working Group I Report “The Physical Science Basis”, 2007.
- 7) Oouchi, K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta, S. Kusunoki, and A. Noda: 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*, 84-2, 259-276, 2006.
- 8) 端野道夫・桑田康雄：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-8，1987.
- 9) 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・伊藤吉孝：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. 271-275，2000.
- 10) 加藤史訓・鳥居謙一・柴木秀之・鈴山勝之：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. 291-295，2003.
- 11) 國富將嗣・高山知司：大阪湾における高潮と高波の同時生起確率特性，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 216-220，2005.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 河合弘泰・竹村慎治・山城賢・柴木秀之・平石哲也：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. 301-305，2001.
- 15) 筒井純一：地球温暖化による熱帯低気圧の変化に関する研究動向，海洋開発論文集，第 23 巻，pp. 45-50，2007.
- 16) 花山格章・関本恒浩・鶴飼亮行・高木泰士・畑田佳男・山口正隆：確率的台風モデルを用いた信頼性設計法，海岸工学論文集，第 49 巻，pp. 926-930，2002.
- 17) 河合弘泰・竹村慎治・原信彦：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. 251-255，2002.
- 18) 河合弘泰・橋本典明・松浦邦明：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特性，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 301-305，2007.
- 19) 永井紀彦：全国港湾海洋波浪観測 30 年統計 (NOWPHAS 1970-1999)，港湾空港技術研究所資料，No. 1035，388p.，2002.
- 20) 河合弘泰・佐藤真・清水勝義・佐々木誠・永井紀彦：全国港湾波浪観測年報 2007，港湾空港技術研究所資料，No. 1193，93p.，2009.
- 21) 清水勝義・永井紀彦・里見茂・李在炯・富田雄一郎・久高将信・額田恭史：長期波浪観測値と気象データに基づく波候の変動解析，海岸工学論文集，第 53 巻，pp. 131-135，2006.
- 22) 菅原一晃・佐藤和敏・永井紀彦・川口浩二：全国港湾海洋海象観測施設台帳 (ナウファス施設台帳Ⅲ)，港湾技研資料，No. 941，1999.
- 23) 永井紀彦・菅原一晃・渡邊弘・川口浩二・三原正裕・高島勝美：長期検潮記録を用いた平均水位・潮位・長周期波解析，海岸工学論文集，第 44 巻，pp. 261-265，1997.
- 24) 筒井純一・磯部雅彦：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. 9-19，1992.
- 25) 鈴木武：高潮浸水シミュレーションによる三大湾奥部の浸水被害の感度解析，海洋開発論文集，第 24 巻，pp. 453-458，2008.
- 26) 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.
- 27) 下迫健一郎・高橋重雄・高山知司・谷本勝利：変形を許容した混成防波堤の新設計法の提案～期待滑動量を用いた信頼性設計法～，海岸工学論文集，第 45 巻，pp. 801-805，1998.
- 28) 高山知司：防波堤の滑動安定性に及ぼす海面上昇の影響，海岸工学論文集，第 37 巻，pp. 873-877，1990.
- 29) 河合弘泰：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. 321-326，1999.
- 30) 酒井和彦・岡安章夫：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. 686-690，2004.