



d4PDFを用いた潮位偏差の 将来変化予測手法の提案

港湾空港部港湾建設課 ○恵平 寿輝

船橋 雄大

北日本港湾コンサルタント(株) 佐藤 典之

気候変動の影響により高潮による潮位偏差は将来増大することが予測される。このため、今後の港湾・漁港の気候変動対策を検討する上で港の利用や施設の安全性に影響する将来の潮位偏差を適切に把握することが重要である。本稿は、d4PDFを用いて潮位偏差を簡易な手法で計算し、実測値との比較によって補正した上で将来変化率を求め、現行の既往最大潮位偏差に乗じることで将来の潮位偏差を予測する手法を提案するものである。

キーワード：気候変動、潮位偏差、d4PDF、高潮

1. はじめに

港湾・漁港施設の計画・設計・建設・管理や沿岸域での防災活動にあたっては、常に潮位や波浪の影響を考慮しなければならない。

近年、潮位や波浪に関して、地球温暖化に伴う将来の気候変動の影響について、研究が進んでいる。2021年に公表された「気候変動に関する政府間パネル第6次評価報告書」¹⁾では、2°Cの気温上昇に対して、台風の発生数は14%減少するが、強い台風の発生割合は13%増加し、平均強度は5%増加すると報告されている。

このような背景から、今後、北海道の港湾や漁港においても、気候変動対策を検討する上で、台風や低気圧の強化に伴う、高潮による潮位偏差の将来予測値を適切に算定・把握することが重要である。一方、気候変動に伴う高潮による潮位偏差の将来予測値の検討は、平均海面水位上昇量の将来変化予測に比べて十分でない状況にある。

将来の潮位偏差を予測するためには、現在と将来の温度上昇を考慮した海上風と気圧のデータが必要となる。その一つとしては、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」²⁾³⁾(以下、d4PDFという)を利用する方法がある。d4PDFは、地球温暖化緩和・適応策の検討に利用出来るように整備されたアンサンブル気候予測計算結果のデータベースである。これは現在気候に当たる過去、将来2°C上昇、将来4°C上昇のシナリオについて高解像度の気象モデルによる多数のアンサンブル計算を行った結果を整理したものであるため、その活用により、顕著な大気現象について、統計的に信頼性の高

い将来予測情報が得られることが期待されている。しかし、d4PDFには数千年の膨大なデータがあることから、高潮予測に用いられることの多い非線形長波方程式や高潮モデルを用いた潮位計算には大きな計算負荷がかかることになる。加えて、d4PDFの海上風と気圧のデータには気象モデル固有のバイアス(計算値と実測値とのズレ)があるため、その補正が必要となる。その際、わが国の沿岸域では、台風に加えて温帯低気圧によって引き起こされる潮位偏差が重要であり、発生要因によってバイアスは異なることから、台風と温帯低気圧それぞれについてバイアス補正を行う必要がある。

そこで本稿では、d4PDFを用いた高潮による潮位偏差を簡易的な手法で計算し、実測値との比較によってバイアス補正をした上で、将来変化率を算定し、現行の既往最大潮位偏差に乗じることで、将来の潮位偏差を予測する手法を提案する。

2. 検討方法

(1) 検討手順

本検討の実施手順を以下に示す。

- ① 実測値である潮位観測データから年最大潮位偏差を抽出し、極値統計解析を行うことで既往最大潮位偏差の再現期間を推定する。
- ② 潮位偏差の計算は簡易な手法である線形長波方程式を用いて算出し、実測値と比較することでその再現性を確認すると共に、生じた誤差について実測値を用いた補正を行う。

- ③ d4PDFの海上風と気圧のデータを用いて、②により潮位偏差を計算する。
- ④ 過去実験による予測結果から、台風と温帯低気圧それぞれについて年最大潮位偏差を抽出して確率分布を作成し、①の実測値の極値分布関数と比較することでバイアス補正を行う。
- ⑤ ④で得られたバイアスを将来実験にも適用して、将来実験による予測結果をバイアス補正する。
- ⑥ 台風と低気圧それぞれについて、①で設定した再現期間に相当する潮位偏差を読み取って過去実験に対する将来実験の変化率（＝（将来実験の潮位偏差／過去実験の潮位偏差－1）×100％）を評価する。また、台風と低気圧の確率分布を合成して、両者を考慮した潮位偏差の将来変化を評価する。

以上の実施手順をフローにまとめたものを、図-1に示す。

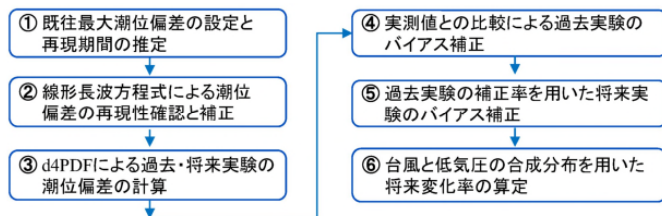


図-1 潮位偏差の将来予測検討フロー

(2) 検討対象港の選定

北海道における潮位観測は、北海道開発局・気象庁・国土地理院の所管の検潮所において全33地点で実施されている。（図-2）

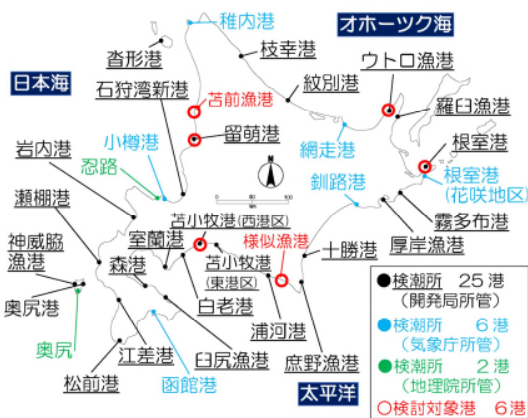


図-2 北海道の検潮所位置と検討対象港

この中から、3つの海域（太平洋、日本海、オホーツク海）を網羅するように、太平洋2地点（苫小牧西港、様似漁港）、日本海2地点（留萌港、苫前漁港）、オホーツク海2地点（根室港、ウトロ漁港）の計6地点を検討の対象に選定した。

3. 検討結果

(1) 既往最大潮位偏差の設定と再現期間の推定

検討に用いる潮位観測の実測値は、日本海洋データセンター⁴が公表している潮汐（毎時潮高）データとし、公表されていないウトロ漁港分は、当局保管のデータを使用した。また、潮位観測を行っていない苫前漁港と様似漁港は、それぞれ近傍の留萌港と浦河港の潮位観測の実測値で代用することとした。実測値の潮位偏差は、潮位観測の結果から天文潮を差し引いて算出し、年最大値を抽出した。天文潮については、「日本沿岸 潮汐調和定数表」⁵から各対象港の60分潮の振幅と遅角データを用いて計算した。調和定数の無いウトロ漁港は、紋別港の数値を代用して計算し、ウトロ漁港近傍のコイセボイとの潮時差（両港の潮位の時間のずれ：0時間）と潮高比（コイセボイの潮位は紋別港の0.95倍）を用いて補正を行った。

各対象港の潮位観測データから年最大潮位偏差を抽出し再現期間との関係（確率分布）を図-3に整理した。

年最大潮位偏差の確率分布に最も適合する極値関数を図中に青線で示す。また、年最大潮位偏差の最大値、すなわち既往最大潮位偏差の値を図中に示す。極値関数の既往最大潮位偏差に対応する再現期間を図中の赤点線のように読み取り、これを各対象港の潮位偏差の将来変化を評価するための再現期間に設定した。各対象港における既往最大潮位偏差と設定した再現期間を表-1に示す。

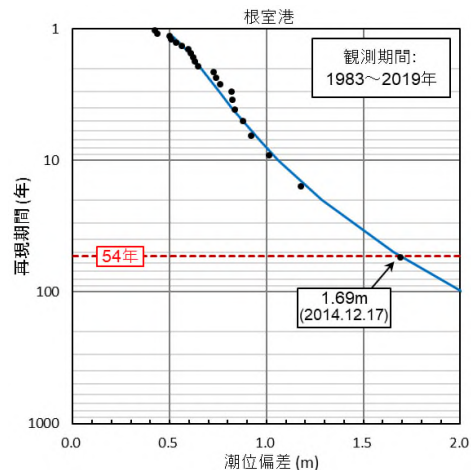


図-3 既往最大潮位偏差と再現期間（根室港）

表-1 各対象港における既往最大潮位偏差と再現期間

港名	既往最大潮位偏差	観測期間	再現期間	発生時期等	備考
留萌港（日本海）	0.89m	1983～2019年	76年	2004/9/8 15:00	
苫小牧西港（太平洋）	0.70m	1967～2019年	68年	1981/8/23 15:00	
根室港（オホーツク海）	1.69m	1983～2019年	54年	2014/12/17 8:49	
苫前漁港（日本海）	0.89m	1983～2019年	76年	2004/9/8 15:00	留萌港で代用
ウトロ漁港（オホーツク海）	0.63m	2016～2022年	11年	2018/12/28 20:00	調和定数は紋別港で代用
様似漁港（太平洋）	0.75m	1965～2019年	110年	1979/10/20 0:00	浦河港で代用

(2) 線形長波方程式による潮位偏差の再現性確認と補正

本稿で提案する手法は、d4PDFの膨大な予測計算結果を用いて解析を行うために、できるだけ単純化・簡易化した方法で予測すべく、潮位予測に式(1)(2)で示す「線形長波方程式」を用いて潮位偏差を予測することとした。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C_D w^2}{h} - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

ここに、 η ：水位(m)、 t ：時間(s)、 h ：水深(m)、 u ：流速(m/s)、 x ：位置(m)、 g ：重力加速度(m/s²)、 ρ_a ：空気の密度(kg/m³)、 ρ_w ：海水の密度(kg/m³)、 C_D ：摩擦係数、 w ：風速(m/s)、 P ：海面更正気圧(kg/m・s²)

式(2)においては、高潮の主な要因である風による吹き寄せ（右辺第1項）と気圧低下による海面の吸い上げ（右辺第2項）を考慮している。

本予測手法の再現性を確認するために、気圧・風データに気象庁のJRA55及びGPVによる再解析データを用いて線形長波方程式による潮位偏差の計算を行い、観測による潮位偏差の実測値と比較して精度の検証を行った。

図-4は、根室港で年最大潮位偏差が生じた際の実測値と計算値の時刻歴を比較したものである。これより、潮位偏差のピーク発生時刻を概ね再現できていることを確認した。また他の対象港でも同様の結果を確認することができた。

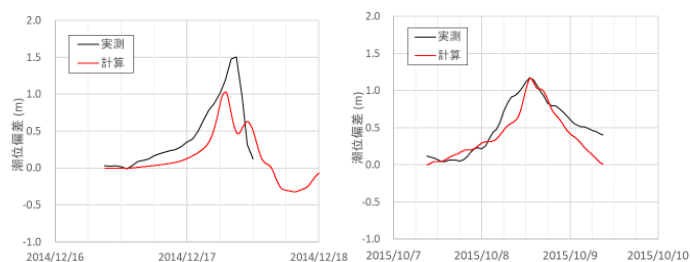


図-4 潮位偏差の実測値と計算値の時刻歴の比較
(根室港：上位2ケース)

次に、根室港における17年分の年最大潮位偏差の実測値と計算値の相関関係を図-5に示す。その結果、根室港の場合、原点を通る1次回帰式の傾きはおおよそ1.30であり、計算値は実測値より小さめに推算される傾向にあることが分かった。他の対象港も同様の傾向であったことから、対象港ごとに、1次回帰式の傾き（回帰係数）を乗じて線形長波方程式による計算結果を補正した。

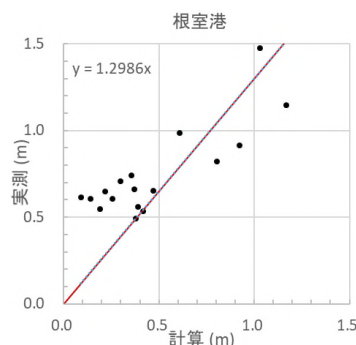


図-5 潮位偏差の実測値と計算値の相関関係（根室港）

以上より、実測値との比較による潮位偏差のピーク発生時刻及び相関関係から計算値の補正を行うことで、式(1)と(2)を用いて潮位偏差の計算を行う本手法の再現性を確認できた。

(3) d4PDFによる過去・将来実験の潮位偏差の計算

d4PDFの過去実験50メンバ(60年/メンバ×50メンバ=3,000年)、将来2℃上昇実験及び4℃上昇実験48メンバ(60年/メンバ×48メンバ=2,880年)のデータについて、式(1)(2)による潮位偏差の計算を実施し、実測値との相関関係による補正を行った。

潮位偏差を引き起こす高潮の要因としては、台風と低気圧があり、d4PDFの気象モデルによって計算する際に、それぞれ異なるバイアスが生じるため、バイアスの補正に当たっても、潮位偏差をそれぞれのケースに分類して検討を行った。

台風と低気圧の抽出は、計算結果から各年の潮位偏差の上位10件程度を抽出した後、d4PDFの台風トラックデータから台風に起因する年最大潮位偏差を抽出し、残りの上位データの中の最大値を低気圧による年最大潮位偏差とした。

図-6は、根室港の台風と低気圧について、計算結果から抽出した年最大潮位偏差と再現期間の関係（確率分布）を示したものである。図中には実測値による確率分布を黒点で併記している。

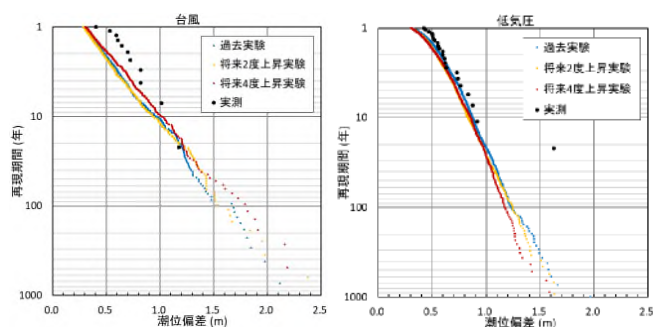


図-6 台風と低気圧による潮位偏差の計算（根室港）

(4) 実測値との比較による過去実験のバイアス補正

バイアス補正には、安田ら⁹⁾による気圧・風速を補正する方法や有村ら⁷⁾による台風を対象とした気圧を補正する方法など、気象場を補正する方法が用いられているが、その方法はまだ確立されていない。そこで本検討では、気圧場や風速場の補正は行わずに、結果として得られる潮位偏差を実測値で補正する手法を用いた。

補正方法は、クオンタイルマッピング法を用いて、潮位偏差の計算による確率分布を、同じ再現期間の実測値の極値分布に合うように補正した。図-7に、根室港を対象に台風・低気圧それぞれについてバイアス補正した結果を示す。

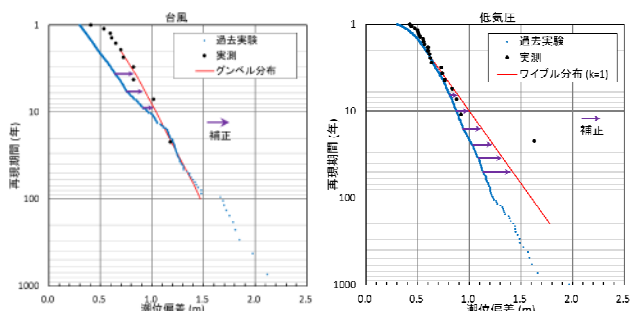


図-7 実測値による過去実験のバイアス補正 (根室港)

(5) 過去実験の補正率を用いた将来実験のバイアス補正

前述の(4)で過去実験のバイアス補正のために作成した補正係数(再現期間ごとに求めた極値関数による潮位偏差と計算による潮位偏差の比の集合)を用いて、将来2℃上昇及び4℃上昇実験の結果にもバイアス補正を行う。根室港について、バイアス補正を行った結果を図-8に示す。

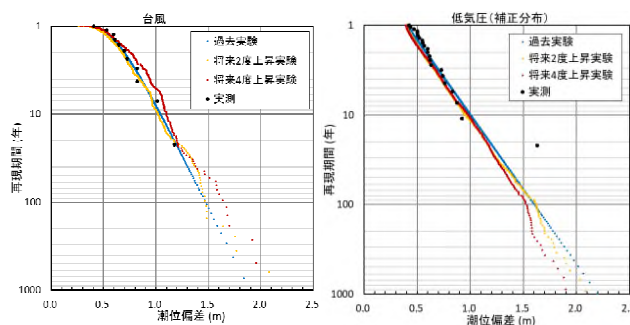


図-8 将来実験のバイアス補正 (根室港)

(6) 台風と低気圧の合成分布を用いた将来変化率の算定

バイアス補正後、過去実験・将来実験のそれぞれについて、台風と低気圧の分布をあわせた合成分布を作成し

た。合成分布は、低気圧と台風の同じ潮位偏差の未超過確率を掛け合わせることで作成した。

図-9は、実測値の潮位偏差のほかにも、上記方法で作成したバイアス補正済みの過去実験、将来2℃上昇実験及び将来4℃上昇実験の潮位偏差と設定している再現期間を示すものである。この結果から、各対象港の既往最大潮位偏差の再現期間に相当する潮位偏差を読み取り、潮位偏差の将来変化を評価した。

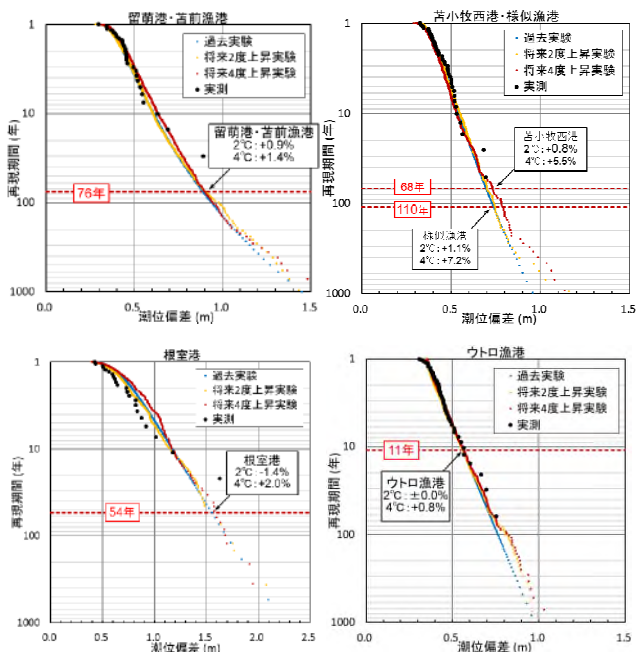


図-9 潮位偏差と再現期間の分布

(上段左: 留萌港・苫前漁港、上段右: 苫小牧西港・様似漁港
下段左: 根室港、下段右: ウトロ漁港)

表-2は、過去実験に対する将来2℃及び4℃上昇時の潮位偏差の変化率を示したものである。2℃上昇の根室港の変化率はマイナス値だったため、変化率の危険側を考慮して変化しないものとした。なお、分析を行っていない苫前漁港、ウトロ漁港、様似漁港は近傍の留萌港、紋別港、苫小牧西港の値を用いた。

各港の変化率は、将来2℃上昇時は留萌港で+0.9%、苫小牧西港で+0.8%と変化率は同等であった。一方、将来4℃上昇時には、留萌港は+1.4%、苫小牧西港で+5.5%となり、太平洋側の変化率が大きかった。

表-2 将来潮位偏差の変化率

港名	最大潮位偏差	変化率			備考
		再現期間	2度上昇	4度上昇	
留萌港(日本海)	0.89m	76年	+0.9%	+1.4%	
苫小牧西港(太平洋)	0.70m	68年	+0.8%	+5.5%	
根室港(オホーツク海)	1.69m	54年	-1.4%⇒0.0%	+2.0%	
苫前漁港(日本海)	0.89m	76年	+0.9%	+1.4%	留萌港で代用
ウトロ漁港(オホーツク海)	0.63m	11年	+0.0%	+0.8%	調和定数は紋別港で代用
様似漁港(太平洋)	0.75m	110年	+1.1%	+7.2%	苫小牧西港で代用

4. まとめ

本稿の主要な結論を以下に示す。

- (1) 線形長波方程式による潮位推算において、推算値と実測値の相関関係から計算値の補正を行うことで再現性が向上した。
- (2) d4PDFによる潮位偏差の計算においては、発生要因によりバイアスが異なることから、発生要因毎に潮位偏差の計算値を実測値で補正することで、推算値の精度向上を図った。
- (3) 台風と低気圧の分布を合わせた合成分布を作成し、将来変化率の算定を行った。
- (4) 本検討における潮位偏差の将来変化率は、海域毎に着目すると、日本海側では将来2°C上昇では+0.9%、将来4°C上昇では+1.4%、太平洋側では将来2°C上昇では+0.8~1.1%、将来4°C上昇では+5.5~7.2%となり、太平洋側の将来変化率が大きかった。

5. おわりに

本稿の検討結果により、算出した将来変化率を既往最大潮位偏差に乗じることで、将来の潮位偏差を推定する

ことが可能となった。

ただし、現在想定している潮位偏差が既往最大潮位偏差である場合には、統計誤差が大きくなるといったことに注意が必要であるとともに、十分に長い期間を対象とした高潮推算を実施する必要があることに注意が必要である。

参考文献

- 1) 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)：第6次評価報告書(AR6), 2021.8.
- 2) Mizuta, R., and Coauthors: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60km global and 20km regional atmospheric models, *The Bulletin of the American Meteorological Society*, pp.1383-1393, 2016.
- 3) d4PDF: 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース, <https://www.miroc-gcm.jp/d4PDF>, 参照 2022-04-01.
- 4) 日本海洋データセンターHP：潮汐データ
- 5) 海上保安庁：日本沿岸 潮汐調和定数表，平成4年2月
- 6) 安田誠宏，片平成明，森信人，間瀬肇，澁谷容子: 気候モデル台風のバイアス補正手法の開発と高潮の将来変化のアンサンブル予測，*土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol. 71, No.2, pp.I_1507-I_1512, 2015.
- 7) 有村盾一，邱中睿，岡安徹也，秩父宏太郎，渡邊国広，森信人: 大規模アンサンブル気候予測データベース(d4PDF)の台風を対象としたバイアス補正手法とその将来変化予測，*土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol. 77, No.2, pp. I_973-I_978, 2021.