

d4PDFを用いた沖波波高の上振れを考慮した 将来変化予測手法の提案

港湾空港部港湾建設課 ○千葉 拓永
船橋 雄大
北日本港湾コンサルタント(株) 佐藤 典之

今後の港湾・漁港の気候変動適応策を検討する上で、将来増大が予測される沖波波高を適切に把握することが重要である。沖波波高の将来変化比は様々な将来の海面水温パターンによって異なる値となるため、将来気候の不確実性を考慮すると、平均値だけでなく上振れを想定した90%タイル値を設定する必要がある。本稿は、d4PDFを用いた波浪推算から波高の将来変化比の90%タイル値を効率的に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、沖波波高、d4PDF、90%タイル値

1. はじめに

港湾・漁港施設の計画・設計・施工・管理にあたっては、常に波浪の影響を考慮しなければならない。

近年、波浪に関する地球温暖化の影響について研究が進められており、「日本の気候変動2020」¹⁾によると、日本では太平洋沿岸を中心に広い範囲で高波は増加傾向となり、不確実性は大きいが高波時の波高は高くなるとの将来予測が報告されている。

このような背景を踏まえ、北海道の港湾・漁港の将来的な気候変動対策を検討する上で、波高増大に対する将来予測値を適切に把握する必要がある。

将来の波浪変化を予測する方法の一つとしては、「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⁾ (database for Policy Decision making for Future climate change)」(以下、d4PDFという)を利用した波浪推算がある。

d4PDFは、地球温暖化の影響を評価し、気候変動に対する適応策を策定する為に高解像度の気候モデルを用いて、多数のアンサンブル(実験例)気候予測計算結果を整理したデータベースである。顕著な気象現象について、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おり、現在における過去実験、将来2°C上昇と4°C上昇シナリオにおける結果からアンサンブル気候実験が行われている。その海上風データを用いた波浪推算により、波高の将来変化の予測が可能である。

50年確率波高の将来変化については、本多ら³⁾がd4PDFをもとに経験的台風モデルによって算出した風場を用いてWAVEWATCH III⁴⁾(以下、WW3と略す)によ

る波浪推算を行い、3大湾(東京湾・伊勢湾・大阪湾)における過去実験に対する将来2°C上昇時の将来変化比を求めている。その際に、d4PDFの将来2°C上昇実験には6つの異なる海面水温パターン(SST; Sea Surface Temperature)があり、それぞれのSSTの条件下で得られる50年確率波高は異なることに着目し、SSTごとに将来変化比を求めることで、6つのSSTを平均した将来変化比及び、予測の上振れを想定した90%タイル値による将来変化比を求めている。

北海道においては、野村ら⁵⁾により、50年確率波高の将来変化比を6つのSSTを統合した値として作業負荷の低い手法で求められているが、上振れを考慮した将来変化比は求められていない。

そこで本稿では、北海道の港湾・漁港において、野村ら⁵⁾により求められた将来変化比を用いて、沖波波高である50年、及び30年確率波高の上振れを想定した90%タイル値による将来変化比について、効率的かつ、精度を確保して算出する手法を提案するものである。

2. 課題と対応方針

50年、及び30年確率波高の将来変化比は、本多ら³⁾による考え方にならない、6つのSSTの平均値と90%タイル値として求める必要がある。なお、90%タイル値とは6つのSSTによる将来変化比を大きい順に並び替えたとき、最小値を0%タイル値、最大値を100%タイル値として、90%に相当する位置にある値のことを指す。

野村ら⁵⁾は、北海道の3海域において、ナウファスによる実測値として長期波浪観測データを有する日本海側の

留萌港、太平洋側の苫小牧港、オホーツク海側の紋別港の3港を対象に、d4PDFの過去実験と将来2°C上昇実験の風場データを用いてWW3による波浪推算を行い、6つのSSTを統合した360年分（1つのSSTにつき60年分×6つのSST=360年分）の年最大波から、50年確率波高の将来変化比を効率的に算出する方法を提案した。

この方法で得られた将来変化比は6つのSSTを統合した値（以下、統合値と略す）であり、SSTごとに求めた6つの将来変化比の平均値とは異なる。前述のように、平均値と90%タイル値を求めるためにはSSTごとに将来変化比を求める必要があるが、野村ら⁹⁾の手法では計算効率化の観点からWW3による波浪推算を行うデータを将来2°C上昇実験の1つのSSTにつき1メンバ60年分に絞り込んでいるため、年最大波のデータは1メンバ60個しか得られていない。d4PDFの将来2°C上昇実験では1つのSSTにつき9メンバ540年分のデータがあり、メンバごとに初期条件が異なる風場データとなっているため、波浪推算によって得られる50年確率波高もメンバごとに異なる。絞り込んだ60個のデータのみで50年確率波高を算出すると精度の低い値となる可能性が高い。

このため、新たに1つのSSTにつき残り8メンバ480年分の波浪推算をWW3により行い年最大波を求めて、合計9メンバ540年分の年最大波からSSTごとの平均的な50年確率波高を求めることが望ましいが、計算には多大な労力と時間がかかることになる。

そこで本検討では、効率的に50年確率波高の将来変化比を算出するという観点から、SMB法によって過去実験の50メンバ×60年分=3,000年分と将来2°C上昇実験6SST×9メンバ×60年分=3,240年分の波浪推算を行い、年最大波を求めて50年確率波高を算出し、6つのSSTによる将来変化比の平均値及び90%タイル値を算出する方法を提案する。

具体には、SMB法では6つのSSTを統合して50年確率波高を求めた上で統合値としての将来変化比を算出し、SSTごとに算出した将来変化比の平均値、及び90%タイル値を統合値で割って統合値に対するそれぞれの比を算出するのみとして、この比を野村ら⁹⁾が求めたWW3による将来変化比の統合値に掛ける手法を採用した。

ただし、本手法はWW3による波浪推算から得られる50年確率波高に比べると精度が低くなるという課題がある。そこで、WW3で波浪推算を行った場合と同程度の精度を持たせる手法として、6つのSSTごとにSMB法によって推算された年最大波高の最大値が上向DOL基準による基準波高を超えている場合は、最大値を除外する方法を採用した。なお、30年確率波についても、同様の考え方により算出する。

3. 検討方法

本検討の実施手順を以下に示す。

- ① d4PDF全球モデルの過去実験50メンバ×60年=3,000年分の風場のデータからSMB法により波浪推算を実施した上で、推算結果から3,000個の年最大波高を抽出し確率分布を作成する。SMB法は風による波の発達量を推算する方法であり、基本式として以下のウィルソンの式を用いる。

$$\frac{gH}{U^2} = 0.30 \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{-2} \right] \quad (1)$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = 1.37 \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^{-5} \right] \quad (2)$$

ここに、H：有義波高(m)、T：有義波周期(s)、U：風速(m/s)、F：吹送距離(m)、g：重力加速度(m/s²)である。

- ② 年最大波高の確率分布を実測値であるナウファスの年最大波高の極値分布関数に合わせるようにバイアス補正する。
- ③ バイアス補正した確率分布から寶¹⁰⁾によるノンパラメトリック法を用いて過去実験に対する50年及び30年確率波高を推定する。その際、ブートストラップ法¹¹⁾による4,000回のリサンプリングを行い確率波高の偏りを抑える。
- ④ d4PDF全球モデルの将来2°C上昇実験54メンバ×60年=3,240年分の風のデータからSMB法により波浪推算を実施した上で、推算結果から3,240個の年最大波高を抽出し確率分布を作成する。
- ⑤ 抽出した年最大波高を6つのSST (CC,GF,HA,MI,MP,MR) ごとの540個 (9メンバ×60年=540年) のデータにグループ分けした上で確率分布を作成する。
- ⑥ SSTごとに540個の年最大波高の中の最大値が上向DOL基準による基準波高を超えている場合は、最大値を除外して確率分布を作成する。
- ⑦ 6つのSSTを統合した年最大波高の確率分布、及びSSTごとの年最大波の確率分布について過去実験で得られたバイアス補正値を適用してバイアス補正する。
- ⑧ 6つのSSTを統合しバイアス補正した確率分布、及びSSTごとにバイアス補正した確率分布からノンパラメトリック法を用いて50年と30年確率波高を推定する。その際、ブートストラップ法による4,000回のリサンプリングを行う。
- ⑨ 将来2°C上昇実験の50年及び30年確率波高の統合値及び6つのSSTごとの50年及び30年確率波高を、過去実験の50年及び30年確率波高でそれぞれ割って、

統合値及びSSTごとの将来変化比を算出する。

- ⑩ 算出したSSTごとの6つの将来変化比から平均値、及び90%タイル値を算出する。
- ⑪ 将来変化比の平均値、及び90%タイル値を統合値で割ってそれぞれの比を求め、野村ら⁹⁾によるWW3推算値から求めた統合値に掛けることで、WW3で波浪推算を行った場合と同程度の精度を持った将来変化比の平均値と90%タイル値を求める。

以上の実施手順をフローにまとめたものを、図-1に示す。

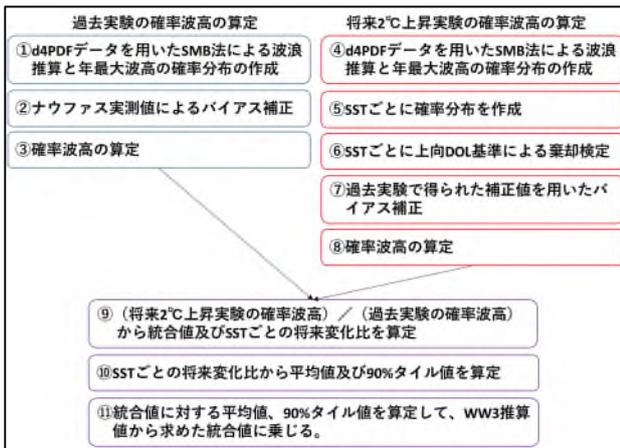


図-1 実施手順のフロー

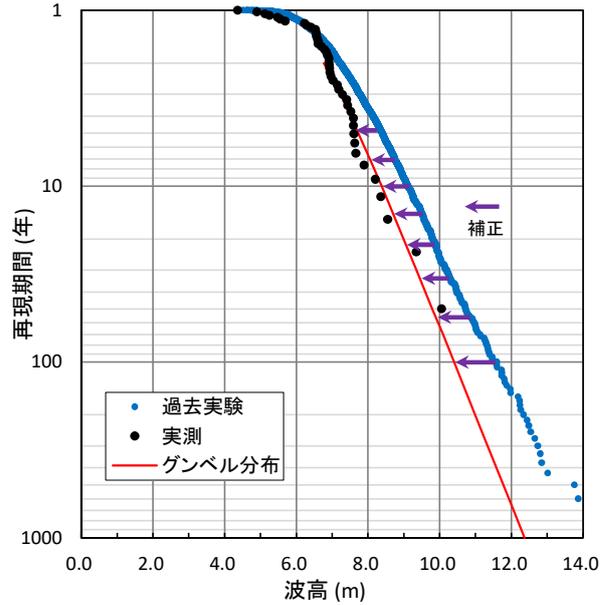


図-2 過去実験の確率分布とバイアス補正 (留萌港)

表-1 過去実験における確率波高

確率波高	苫小牧港	留萌港	紋別港
30年確率波高	7.114m	9.514m	7.712m
50年確率波高	7.913m	10.031m	8.057m

4. 検討結果

(1) 検討対象港の選定

本検討では、北海道の3海域を代表する地点として、野村ら⁹⁾によって将来変化比の統合値が求められている日本海側の留萌港、太平洋側の苫小牧港、オホーツク海側の紋別港の3港を対象港に選定した。

(2) 過去実験における確率波高

SMB法により、d4PDF全球モデルの過去実験3,000年分(50メンバ×60年=3,000年分)の風場データを用いて留萌港、苫小牧港、紋別港の3港の波浪推算を実施し、推算結果から3,000個の年最大波高を抽出して確率分布を作成した。3港のうち、留萌港の確率分布を図-2に青点で示す。この確率分布を、黒点で示すナウファスの実測値による確率分布に最も適合する極値分布関数(赤線)に対して紫矢印で示すようにクオンタイルマッピング法を用いてバイアス補正を行った。

バイアス補正を行った確率分布から、ノンパラメトリック法、及びブートストラップ法を用いて算出した各港の50年、及び30年確率波高を表-1に示す。

(3) 将来2°C上昇実験における確率波高

d4PDF全球モデルの将来2°C上昇実験3,240年分(54メンバ×60年=3,240年分)の風場データを用いてSMB法により3港の波浪推算を実施し、推算結果から3,240個の年最大波高を抽出して確率分布を作成した。3港うち、留萌港の確率分布を図-3に青点で示す。この確率分布を過去実験で得られたバイアス補正值を適用してバイアス補正したものを図-3に赤点線で示す。

バイアス補正を行った確率分布から、ノンパラメトリック法、及びブートストラップ法を用いて算出した統合値としての各港の50年、及び30年確率波高を表-2に示す。

次に、抽出した3,240個の年最大波高を6つのSSTごとに540個(9メンバ×60年=540年分)のデータにグループ分けして確率分布を作成した。

その際に精度を確保するため、確率分布を極値分布関数に当てはめた場合の上向DOL基準による基準波高(最大値偏差の95%非超過確率の波高)を年最大波高の最大値が超えている場合は最大値を除外して確率分布を作成した。具体には、表-3に示すように、苫小牧港のMRと紋別港のMIにおいて、波高上位5件の年最大波高をみると網掛けで示す順位1位の年最大波高が基準波高を超えているため除外した。

作成した確率分布に過去実験で得られたバイアス補正値を適用してバイアス補正した。3港うち、留萌港のバイアス補正後の6つのSSTの確率分布を図-4に示す。

バイアス補正を行った確率分布から、ノンパラメトリック法、及びブートストラップ法を用いて算出したSSTごとの各港の50年、及び30年確率波高を表-4、表-5に示す。

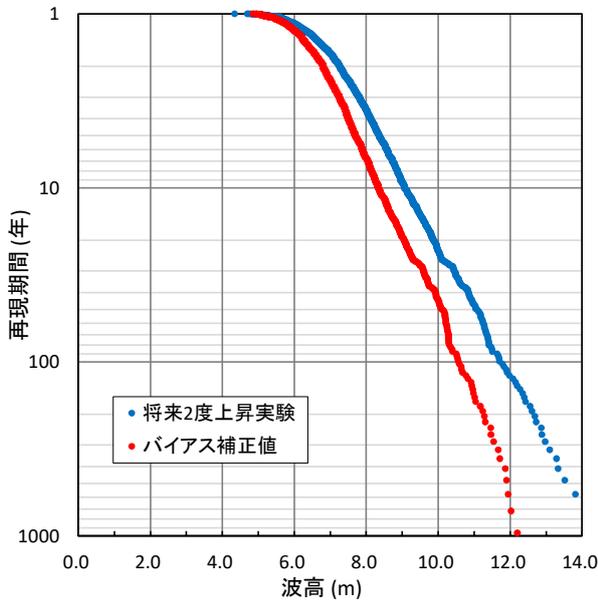


図-3 将来2°C上昇実験の確率分布とバイアス補正 (留萌港)

表-2 将来2°C上昇実験における確率波高 (統合値)

確率波高	苫小牧港	留萌港	紋別港
30年確率波高	7.497m	9.739m	7.698m
50年確率波高	8.356m	10.350m	8.106m

表-3 上向DOL基準による年最大波高の棄却検定結果

波高順位	SST	苫小牧港	紋別港
	MR	MI	
1		13.772m	11.442m
2		11.815m	10.643m
3		11.273m	9.969m
4		11.123m	9.923m
5		11.079m	9.739m
基準波高		13.464m	10.847m
適用極値分布		ワイブルk=1.4	ワイブルk=2.0

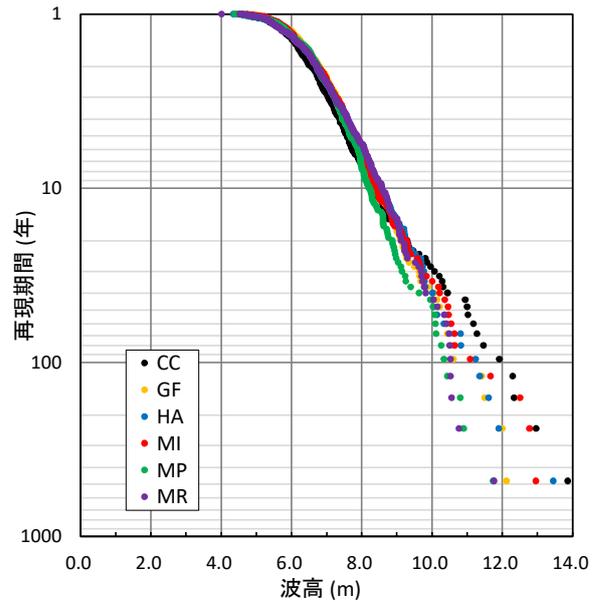


図-4 将来2°C上昇実験のSST別のバイアス補正後の確率分布 (留萌港)

表-4 将来2°C上昇実験におけるSST別の30年確率波高

SST	苫小牧港	留萌港	紋別港
CC	7.529m	10.056m	7.543m
GF	7.639m	9.681m	7.430m
HA	7.466m	9.823m	7.639m
MI	7.437m	9.890m	8.172m
MP	7.072m	9.405m	7.858m
MR	8.069m	9.710m	7.755m

表-5 将来2°C上昇実験におけるSST別の50年確率波高

SST	苫小牧港	留萌港	紋別港
CC	8.320m	10.911m	7.946m
GF	8.807m	10.307m	7.899m
HA	8.340m	10.316m	7.946m
MI	8.484m	10.514m	8.819m
MP	7.645m	9.984m	8.207m
MR	8.677m	10.252m	8.138m

(4) SMB法による確率波高の将来変化比

3港の2°C上昇実験の50年及び30年確率波高の統合値、及び6つのSSTごとの確率波高を過去実験の50年及び30年確率波高でそれぞれ割って、統合値及びSSTごとの将来変化比を算出した。算出したSSTごとの6つの将来変化比から平均値、及び90%タイル値 [6つのSSTの100%タイル値 (最大値) と80%タイル値 (2番目に大きい値) の平均値] を算出した結果を表-6及び表-7に示す。

表-6 30年確率波高の将来変化比

SST	苫小牧港	留萌港	紋別港
統合値	1.054	1.024	0.998
CC	1.058	1.057	0.978
GF	1.074	1.018	0.963
HA	1.049	1.032	0.991
MI	1.045	1.040	1.060
MP	0.994	0.989	1.019
MR	1.134	1.021	1.006
平均値	1.059	1.026	1.003
90%タイル値	1.104	1.048	1.039

表-7 50年確率波高の将来変化比

SST	苫小牧港	留萌港	紋別港
統合値	1.056	1.032	1.006
CC	1.051	1.088	0.986
GF	1.113	1.028	0.980
HA	1.054	1.028	0.986
MI	1.072	1.048	1.095
MP	0.966	0.995	1.019
MR	1.097	1.022	1.010
平均値	1.059	1.035	1.013
90%タイル値	1.105	1.068	1.057

(5) WW3による波浪推算と同程度の精度を持つ将来変化比

野村ら⁹⁾によってWW3により求められた将来変化比の統合値を表-8に示す。この値に、表-6及び表-7に示したSMB法による将来変化比から統合値に対する平均値及び90%タイル値の比を求めると表-9及び表-10のようになる。この比に表-8のWW3による統合値を掛けると、WW3で波浪推算を行った場合と同程度の精度を持った将来変化比の平均値と90%タイル値が表-11及び表-12のように求められた。本多ら⁹⁾がWW3によって求めた3大湾の50年確率波高の将来変化比は、平均値が1.00~1.04、90%タイル値が1.03~1.08であり、海域は異なるものの同様の傾向を示していることから、本手法は精度を確保し将来変化比の算出を行うことが可能であることがいえる。

表-8 WW3により求められた将来変化比の統合値⁹⁾

	苫小牧港	留萌港	紋別港
30年確率波高	1.016	1.008	1.026
50年確率波高	1.021	1.009	1.030

表-9 SMB法による30年確率波高の将来変化比の統合値に対する比

	苫小牧港	留萌港	紋別港
平均値	1.005	1.002	1.005
90%タイル値	1.048	1.024	1.041

表-10 SMB法による50年確率波高の将来変化比の統合値に対する比

	苫小牧港	留萌港	紋別港
平均値	1.003	1.003	1.007
90%タイル値	1.046	1.035	1.050

表-11 WW3で波浪推算を行った場合と同程度の精度を持った30年確率波高の将来変化比

	苫小牧港	留萌港	紋別港
平均値	1.021	1.010	1.031
90%タイル値	1.064	1.032	1.068

表-12 WW3で波浪推算を行った場合と同程度の精度を持った50年確率波高の将来変化比

	苫小牧港	留萌港	紋別港
平均値	1.024	1.012	1.037
90%タイル値	1.068	1.044	1.082

5. まとめ

本稿の主要な結論を以下に示す。

- 1) SMB法を用いて確率波高の将来変化比の統合値・平均値・90%タイル値を算出した上で、統合値に対する平均値及び90%タイル値の比を算出し、上向DOLによる棄却を行ったうえで、WW3により算出された既往の将来変化比の統合値に乗じたところ、簡便な手法でもWW3で波浪推算を行った場合と同程度の精度を持った将来変化比の平均値と90%タイル値を求めることができた。
- 2) 本検討で得られた将来変化比は、表-11、表-12のようになり、太平洋側とオホーツク海側の将来変化比が大きくなった。これは、「日本の気候変動2020」¹⁾で示された傾向と同様であった。

6. おわりに

本稿の検討結果により、算出した将来変化比の90%タイル値を既往沖波波高に乗じることで、上振れを考慮した将来の沖波波高を推定することが可能となった。

本手法により、沖波波高の将来変化比を効率的かつ、精度を確保して算定されることが期待される。

参考文献

- 1) 文部科学省及び気象庁：日本の気候変動2020，2020.12.

- 2) 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 2023-04-01
- 3) 本多和彦・成田裕也・岡本侃大・百海郁弥・平山克也・高川智博・森 信人: 3 大湾内の港湾における高潮・波浪への気候変動の影響評価, 国土技術政策総合研究所資料, No.1266, 132p., 2024
- 4) Tolman,H : User manual and system documentation of WAVEWATCH III ver 6.07 , NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note,466p., 2019
- 5) 野村明弘・佐藤典之・石川浩希・早川哲也・石崎慎介・大塚淳一・森信人・渡部靖憲: d4PDF を用いた設計波高の将来変化の効率的な推定手法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , Vol.78, No.2, 1937-1942., 2022
- 6) 寶 馨: 大標本時代の水文頻度解析手法ーリターンピリオドを超えるようなサイズの標本に対する極値データ解析ー, 京都大学防災研究所年報, 第 49 号 B, pp.7-12, 2006
- 7) 岡本侃大・本多和彦・百海郁弥(2023a): ブートストラップ法を用いた高潮・高波の偶然的不確実性の評価, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.71, 22p., 2023
- 8) 小林怜夏・竹信正寛・本多和彦・蒔苗嘉人・村田誠: 気候変動適応策を踏まえた防波堤の設計手法に関する検討, 国土技術政策総合研究所資料, No.1281, 2024