

# 将来気候における日本海、太平洋タイプの冬季爆弾低気圧による高潮リスク

Storm surge risk due to winter bomb cyclones in the Sea of Japan and Pacific Ocean in future climates

北海道大学工学部 ○学生員 今南実(Minami Kon)

北海道大学大学院工学研究院 正員 猿渡亜由未(Ayumi Saruwatari)

## 1. はじめに

日本では1959年の伊勢湾台風や2018年の大阪湾高潮など台風起因する高潮被害が過去に多く発生しており、夏季の熱帯低気圧が高潮を引き起こす気象外力として想定されてきた。一方、東北から北海道にかけての日本において比較的高緯度の地域では、冬季に発達する爆弾低気圧が高潮被害を引き起こすこともある。例えば2014年12月には急速に発達した温帯低気圧が太平洋上を北上し根室湾付近で停滞したことにより、根室市を中心として道東地域に甚大な高潮被害をもたらした。

IPCC第6次評価報告書<sup>1)</sup>におけるSSP5-8.5シナリオでは3.3-5.7℃の世界平均地上気温上昇が予測されており、将来の気候変動に伴い台風を始めとする様々な災害外力の特徴が変化していくことが指摘されている。特に沿岸域では平均海面水位の上昇も相まって高潮等の海象災害リスクが増大していくことが確信的であるとされている。また冬季の高潮外力となる爆弾低気圧については、発生総数は実質的に変化しないが個々の爆弾低気圧の勢力が強くなること、比較的強い低気圧の発生頻度が高くなることも報告されている<sup>2)</sup>。

Yoshida&Asuma<sup>3)</sup>は日本付近を通過する爆弾低気圧を、経路に基づき3つに分類した：(I)日本海またはオホーツク海で最大発達率をむかえる経路、(II)ユーラシア大陸または日本海と太平洋で最大発達率をむかえる経路、(III)太平洋上で発生し太平洋上で最大発達率をむかえる経路である。これらは発達速度や強度、発達時期においてタイプ毎に異なる特徴を有する。共著者ら<sup>4)</sup>はこれら3つの経路タイプ毎に現在気候における高潮リスクを評価し北西太平洋域の主要な湾における統計高潮水位を明らかにした。

本研究では冬季に発生する爆弾低気圧の将来変化と、爆弾低気圧による高潮水位上昇量を発生数の多いYoshida&Asuma<sup>3)</sup>の分類によるI, IIIタイプについて統計的に

評価することを目的とする。

## 2. 計算方法

### 2.1 爆弾低気圧の抽出

本研究では爆弾低気圧情報データベース<sup>5)</sup>と同一のアルゴリズムにより爆弾低気圧の抽出及び追跡を行った。即ち、半径300km範囲内における海面更生気圧が極小となっている箇所を低気圧の中心とし、6時間の移動距離の上限を東西方向に9.0度、南北方向に6.0度と仮定して低気圧経路をトラックしたときに、24時間以上持続したものを爆弾低気圧候補とした。一般的に爆弾低気圧は24時間気圧発達率の最大値が1hPa/hrを超えて急速に発達する低気圧として定義される。本研究では次式で表す12時間発達率 $\epsilon$ が1hPa/hr以上となるものを爆弾低気圧と定義する。

$$\epsilon = \left[ \frac{p(t-6[\text{hr}]) - p(t+6[\text{hr}])}{12[\text{hr}]} \right] \frac{\sin 45^\circ}{\sin \varphi} \quad (1)$$

ここで $\varphi$ は緯度を表す。

気象データとして将来気候アンサンブルデータベースであるd4PDF(database for Policy Decision making for Future climate change)内のデータを用いた。本研究では2089年10月から2090年3月までのd4PDFによる4度上昇将来気候データから抽出した934経路の爆弾低気圧とd4PDFによる過去の1996年10月から1997年3月、1997年10月から1998年3月、2010年10月から2011年3月までの予測データ、過去データの再解析結果を用い統計的評価を行った。なお本研究ではd4PDFデータに対するバイアス補正は行っていない。

### 2.2 三次元流れモデル

本研究では、三次元非静水圧近似流れモデルであるMITgcm(MIT general circulation model)<sup>6,7)</sup>を用いて爆弾低

気圧の通過に伴う高潮発達過程を計算した。このモデルは、マサチューセッツ工科大学が開発した大気・海洋循環モデルであり、幅広いスケールの現象に用いることが可能である。MITgcm では次式で表される運動方程式(水平, 鉛直成分), 質量保存則, 状態方程式に基づき, 流速, 圧力を計算する。

$$\frac{D\mathbf{u}_h}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla_h p + (2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u})_h + \mathbf{F}_h \quad (2)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + (2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u})_v + F_z \quad (3)$$

ここで  $\mathbf{u} = (\mathbf{u}_h, w) = (u, v, w)$  は水平, 鉛直方向流速,  $p$  は圧力,  $\rho$  は密度,  $\boldsymbol{\Omega}$  は地球の自転角速度である。(2) (3) 式の右辺第1項は圧力勾配, 第2項はコリオリ力, 第3項は運動量の外力, 拡散項を表す。この計算モデルによる高潮水位の再現性についての検証は Saruwatari et al.<sup>5)</sup> において行われている。

d4PDF 内のデータに基づき, 海面更正気圧及び 10 m 上空風速を入力した。計算開始時の初期水位についても同じ海面更正気圧データにより, 標準大気圧から 1 hPa の気圧低下につき 0.01 m の水位上昇量として与えた。また海底地形は解像度が 15 秒の GEBCO\_2020 (General Bathymetric Chart of the Oceans) に基づき決定した。

### 3. 計算結果

#### 3.1 過去及び将来気候における爆弾低気圧の特徴

2.1 章の方法で d4PDF から抽出した過去, 将来気候の爆弾低気圧, 並びに爆弾低気圧情報データベースに公開される JRA-25 等の気象庁の大気再解析データから抽出された過去の爆弾低気圧の情報から, 日本付近を通過する爆弾低気圧の特徴を明らかにする。それぞれのデータから抽出された爆弾低気圧の特徴の経路(通過頻度), 中心気圧, 移動速度の分布を図 1, 図 2, 図 3 に表す。

いずれのデータを用いた場合も, 爆弾低気圧の通過頻度は日本列島東側の太平洋上で高くなった(図 1)。温帯低気圧である爆弾低気圧は気圧の傾圧性により発生するものであるが, その急速な発達には台風と同様に海面からの熱供給による上昇気流が大きく寄与していることが明らかとなっており<sup>8)</sup> 海面温度の高い黒潮流路上で爆弾低気圧通過頻度が高くなっているものだと考えられる。また日本海上でも爆弾低気圧が弱い冬の初めや終わりごろでは日本海付近で大気の傾圧

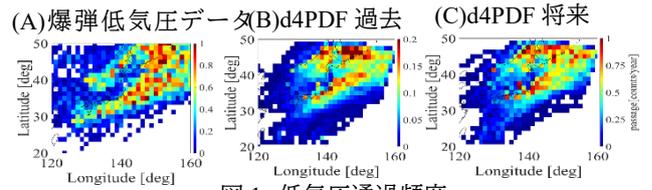


図 1 低気圧通過頻度

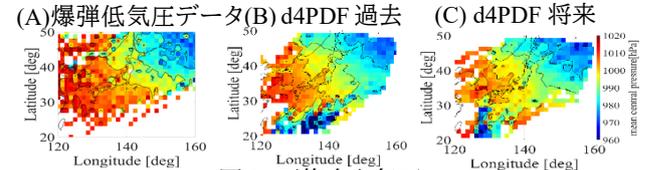


図 2 平均中心気圧

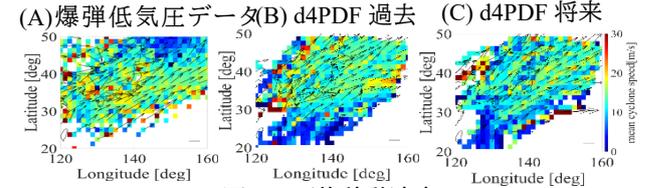


図 3 平均移動速度

性が高くなることが多く, その際には日本海を北上したのちオホーツク海へと到達する爆弾低気圧がしばしば発生することを反映したものと考えられる。d4PDF のデータ同士を比較しても本結果からは過去と将来のデータ間で大きな違いは見られなかった。(図 1, B, C)

爆弾低気圧の平均中心気圧は全体的な傾向として北東に行くほど気圧が低くなる(図 2)。過去のデータ同士を比較すると爆弾低気圧データベースの低気圧よりも d4PDF の低気圧のほうが, 気圧が低くなる傾向があることが確認される(図 2, A, B)。この過去データ同士の際は本来バイアスとして補正されるべきものであるが, 本研究では d4PDF データそのものの特徴を知るためにバイアス補正は行わずに解析を行っている。d4PDF の過去, 将来気候データ同士を比較すると, 将来気候において太平洋上の黒潮経路上で低気圧中心気圧の低下が認められる。これは海水温の上昇により爆弾低気圧の発達を促進され, 将来気候のほうが強い低気圧が発達しやすくなっていることを反映したものである可能性がある。

低気圧の平均移動速度は全体的に 12 m/s 程度であり, 台風と同程度の速度で南西から北東方向に向かって移動する(図 3)。爆弾低気圧情報データベースの低気圧ではオホーツク海上において局所的に平均移動速度が小さい領域が表れているが, これは大気ブロッキングによる爆弾低気圧の停滞が本領域で生じやすいことを反映したものであるが(図 3, A), d4PDF データでは本海域における本傾向は確認できなかった。

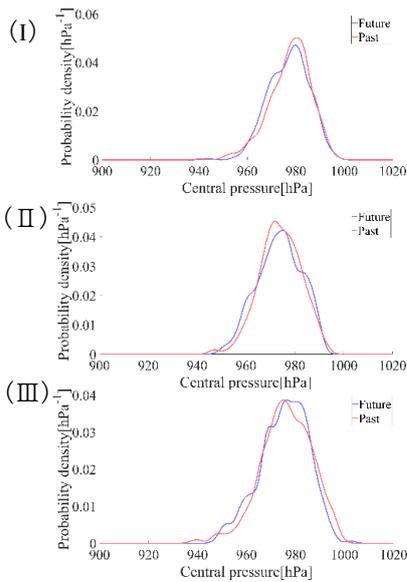


図4 d4PDF 過去と将来における中心気圧の確率

ここでd4PDFから抽出された過去及び将来の爆弾低気圧をYoshida&Asuma<sup>3)</sup>と同様に(I)大陸で発生して日本海で発達、(II)大陸で発達して太平洋で発達、(III)太平洋で発生して太平洋で発達の3タイプに分類し、それぞれの経路についての中心気圧を経路タイプ毎に確率密度で表した(図4)。それぞれのタイプ毎の低気圧サンプル数は過去データで(I)521、(II)388、(III)699、将来データで(I)339、(II)234、(III)361である。3タイプの経路すべてにおいて、ピーク中心気圧は将来気候のほうが数hPa程度高いか同程度であった。ただし中心気圧が概ね970hPaよりも低い低気圧の発生確率は将来気候のほうが過去気候よりもわずかに大きい結果となった。つまり将来気候において爆弾低気圧の全体的な強度は小さくなるものの、970hPa以下の比較的強い爆弾低気圧の発生確率は高くなっていくと推測される。これは小池ら<sup>2)</sup>による将来における爆弾低気圧の傾向予測結果と同様の特徴である。

### 3.2 沿岸地域における高潮水位

d4PDFの将来気候予測データから抽出した爆弾低気圧のうち、北海道付近で高潮被害を起こす可能性のある30経路の低気圧それぞれに対する海水位の応答を計算し、低気圧通過イベント中の最大高潮水位の平均値及び標準偏差を求めた。なお、水位はすべて2014年に発生した根室での高潮における最大気象潮位 $\eta_0 = 1.6\text{ m}$ により無次元化している。30経路のうち11経路が経路I、3経路が経路II、16経路が経路IIIであり、経路IIはサンプル数が少ないため本研

究では経路I、IIIの計算結果について評価を行っていく。

#### (1) 高潮水位の平面分布

図5は経路I、IIIそれぞれにおける最大高潮水位の平均値 $\eta_{max}$ (a)と最大高潮水位の標準偏差 $\sigma_\eta$ (b)を示している。タイプI、タイプIII低気圧に対する平均高潮水位はいずれも低気圧の勢力が増す北東に向かうほど水位が上昇しやすくなる(図5 a1, a2)。日本海からオホーツク海へと抜けるタイプI低気圧では北海道と樺太の日本海とオホーツク海の沿岸において、また太平洋を北上するタイプIII低気圧は北日本の太平洋沿岸とオホーツク海沿岸において水位の上昇が見られた。黒潮流路上を通過するタイプIII低気圧のほうが強く発達しやすい傾向があり、高潮水位もタイプIIIの方が高くなりやすい傾向が確認される。一方最大水位の標準偏差は基本的に低気圧経路上で大きくなるのに加え、湾状の地形となっている場所でも増大する傾向がある(図5 b1, b2)。高潮水位は大まかに低気圧接近に伴う局所的な海面気圧の低下により海面が持ち上げられる吸上げ効果と、湾奥に強風が吹きこむ際に海水が吹き寄せられて水位が上がる吹寄せ効果の和により決定されるが、低気圧経路の差異により吸上げ、吹寄せ水位が大きく異なることが、高潮水位の標準偏差の一因となっている。つまり $\sigma$ が大きい海域では爆弾低気圧の通過経路によっては沿岸地域での高潮水位が非常に大きくなり、甚大な災害をもたらす原因となりうると思われる。

#### (2) 経路タイプ、海岸別で見た高潮水位

高潮被害の起こりやすさは沿岸部での水位上昇量によって決定される。ユーラシア大陸東岸、日本列島から樺太への西岸、東岸をそれぞれL1, L2, L3海岸とした。図6はL1, L2,

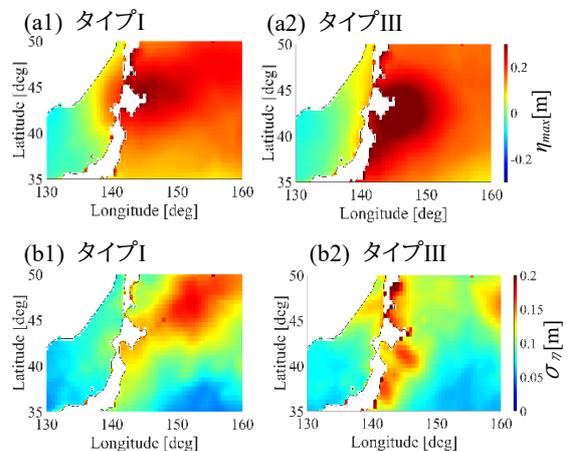


図5 最大高潮水位の平均値 (a)、最大高潮水位の標準偏差 (b)

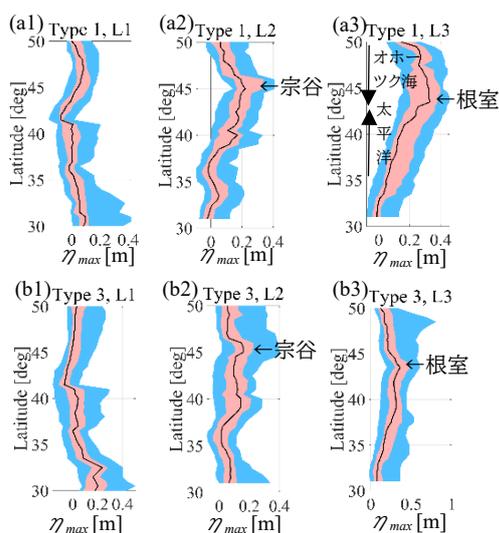


図 6 L1, L3 上における最大高潮水位の南北分布. 実線を最大高潮水位の中央値, 水色の領域を 10~90 パーセンタイル領域, ピンクの領域を 25~75 パーセンタイル領域.

L3 上における最大高潮水位の南北分布である. L1 海岸は爆弾低気圧が北上して十分発達したときに風上側に位置する場合が多いため, いずれの低気圧タイプに対しても最大高潮水位は概ね 0.1m 以下となり, 大きな高潮リスクは見込まれない (a1, b1). L2 海岸ではタイプ I 低気圧が通過する際, 北海道北部の宗谷付近において高潮水位が局所的に上昇し得ることが分かる (a2). タイプ I 低気圧は宗谷上空を通過しオホーツク海へと抜ける経路を取る場合が多く, その直下で水位が上昇しやすいためである. タイプ I 低気圧がオホーツク海上に抜けた後は北海道と樺太のオホーツク海沿岸の水位を広い範囲で上昇させることも確認できる (a3). 即ちこのタイプの爆弾低気圧が通過するとき, L2 海岸の北緯 45 度付近及び L3 海岸の北緯 44 度から 50 度にかけて深刻な高潮被害が発生することが懸念される. 一方タイプ III 低気圧では, 根室を中心として L3 海岸の北緯 38-45 度付近での水位の上昇をもたらした (b3). 過去気象の解析により根室湾はいずれの経路タイプの爆弾低気圧に対しても水位が上昇しやすいことが分かっているが<sup>4)</sup>, 本解析結果においても北西太平洋域において根室湾が最も水位が上昇しやすく, 高潮リスクが高い海域であることが確認された. 今後もタイプ III となる爆弾低気圧が通過する際に, 通過経路によっては根室湾で最大高潮水位が高くなり, 深刻な高潮被害が発生する可能性があると考えられる.

#### 4. まとめ

本研究では, d4PDF による気候予測データを活用し, 日本付近, 北海道付近における高潮のリスク評価を行った. その結果, 冬季爆弾低気圧の将来変化について以下2つのことが推測される: 1 つ目に, 爆弾低気圧の全体的な強度は小さくなるが, 970 hPa 以下の比較的勢力の強い低気圧の発生確率が高くなる. 2 つ目に, 経路 I をとる爆弾低気圧が通過するとき宗谷付近及び根室付近で深刻な高潮被害が発生するリスク, 経路 III をとる爆弾低気圧は通過経路によっては根室付近で深刻な高潮被害が発生するリスクがある. また, リスク評価の確実性を高めるためにより多くの爆弾低気圧データを用い, より適切な爆弾低気圧の抽出を行うこと, d4PDF データのバイアス補正を行うことが必要であることがわかった.

#### 参考文献

- 1) IPCC Sixth Assessment Report AR6, 2021
- 2) 小池ら: MRI-AGCM150 年予測を用いた気候変動に伴う爆弾低気圧の将来変化と日本沿岸波浪への影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 77, 2, pp. I\_955-I\_960, 2021.
- 3) Yoshida ら: Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the northwestern Pacific region. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 1121-1142, 2004.
- 4) Saruwatari ら: Probabilistic assessment of storm surge potential due to explosive cyclogenesis in the northwest Pacific region, *Coastal Engineering Journal*, 61, No.4, pp. 520-534, 2019.
- 5) 爆弾低気圧情報データベース: [http://fujin.geo.kyushu-u.ac.jp/meteorol\\_bomb/](http://fujin.geo.kyushu-u.ac.jp/meteorol_bomb/)
- 6) Adcroft ら: A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers, *J. Geophys. Res.*, 102 (C3), pp. 5753-5766, 1997.
- 7) Marshall ら: Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and non-hydrostatic ocean modeling, *J. Geophys. Res.*, 102 (C3), pp. 5753-5752, 1997.
- 8) Kuwano-Yoshida ら: Storm-Track Response to SST Fronts in the Northwestern Pacific Region in an AGCM, *J. Climate*, 30 (3), pp. 1081-1102, 2017.