将来気候における太平洋縦断タイプ冬季爆弾低気圧による高潮評価法

Storm Surge Assessment Method for Future Climate by a Trans-Pacific Winter Bomb Depression

1. はじめに

我が国で過去に発生した深刻な高潮被害は台風に起 因したものが殆どであったため、現在でも高潮が威力と しては夏季の熱帯低気圧が想定されることが多い。一方 東北から北海道にかけての日本でも比較的緯度の高い地 域では、冬季に発達する爆弾低気圧が高潮被害をもたら す原因となる場合がある。例えば2014年12月には太平 洋上を北上しながら急速に発達した温帯低気圧が根室市 を中心として道東地域に甚大な高潮被害をもたらした。 この時の低気圧は北海道の東側のオホーツク海上で停滞 し、地域によっては暴風被害が長時間に渡り継続した。 また翌2015年10月にも同様の経路を取って発達した爆 弾低気圧が根室市に同程度の高潮被害をもたらした。

Yoshida & Asuma(1)波北西太平洋地域で爆弾低気圧を、 その発生地域と最大発達地域、即ち経路に基き3つに分 類した:日本海上を北上する Type I と日本海から太平 洋へと抜ける Type II、そして太平洋を北上する Type II である。これらはタイプ毎に発達速度や強度、発達する 時期に異なる特徴を有する。共著者ら(2)は過去に襲来 した冬季爆弾低気圧による高潮の発達過程を三次元数値 モデルにより再現し、北西太平洋地域における主要な湾 について低気圧タイプ毎に高潮リスクを評価した。例え ば 2014,2015 年に大きな高潮被害を経験した根室湾では 他の主要な湾と比べていずれのタイプの爆弾低気圧に対 しても高潮リスクが大きいが、特に Type III 低気圧に対 して確率高潮水位が大きくなり注意が必要な地域である ことが明らかとされた。

IPCC 第 5 次報告書(3)によると気候変動に伴い台風を 始め様々な災害外力の特徴が将来的に変化していくこと が指摘されている。冬季の爆弾低気圧についても、発生 総数に大きな変化は現れないものの、中心気圧により表 される低気圧勢力は増加、特に 970hPa 以下にまで発達 する比較的強い低気圧の発生頻度が増加していくとも報 告されている。(4)

そこで本研究では、将来気候における TypeⅢ爆弾低気 圧に起因する高潮水位上昇量を統計的に評価することを 目的とする。

2. 計算方法

2.1 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 MITgeneral circulation model(MITgcm)(5)(6)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 ルでは次の運動方程式ならびに連続式を基礎方程式とし ている。

このモデルは、マサチューセッツ工科大学が開発した大

北海道大学工学部環境社会工学科 本居 大輝 北海道大学工学院 猿渡 亜由美

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.また,このモデルは,以下の等 式に従って,計算が進められる.

$$\frac{\mathrm{D}\mathbf{u}_{h}}{\mathrm{D}t} = -\frac{1}{\rho_{c}}\nabla_{h}p + (2\boldsymbol{\Omega}\times\boldsymbol{u})_{h} + F_{\boldsymbol{u}_{h}}, \qquad (1)$$

$$\frac{\mathrm{D}w}{\mathrm{D}t} = -\frac{1}{\rho_c}\frac{\partial p}{\partial z} + (2\mathbf{\Omega} \times \boldsymbol{u})\boldsymbol{v} + \boldsymbol{F}\boldsymbol{w}, \qquad (2)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \quad . \tag{3}$$

ここで $\mathbf{u} = (u_h, w)$ はそれぞれ水平速度, 垂直速度であ り、pは圧力、 ρ_c は相対密度, Ω は地球の自転速度, F_{u_h} と Fw は, 水平、垂直方向の外力である、また水位変動 η は次式の鉛直積分した連続式に基き更新する。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\eta + H) u_h = 0 \tag{4}$$

ここでHは水深を表す。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 etal.(7)において行われている。

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)内のデータに基き海面更正気圧及び 10m 上空風速を入力した。本データベースについては次章に 詳述する。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 1hPa の気圧低下 につき 0.01mの水位上昇量として与えた。また海底地形 は解像度 15 秒の GEBCO_2020(General Bathymetric Chart of the Oceans)に基き決定した。

表1 計算条件

	領域			
計算領域	$10^{\circ}N - 65^{\circ}N$, $115^{\circ}E - 120^{\circ}W$			
水平解像度	$30' \times 30'$			
垂直解像度	2.0 - 698m			
グリッド数	$251 \times 111 \times 100$			
計算時間間隔	10 sec			



図1 第1領域

本研究では北緯 10 度から 65 度、東経 115 度から西経 120 度までの範囲を計算領域とした (図-1) 水平方向 のグリッド間隔は30'×30'垂 直方向のグリッド間隔は水面に近付くほど細かく 2.0-698mとする、グリッド数は251×111×100(東西× 南北×鉛直方向)とした.計算時間間隔は 10 秒とした。 2.2 将来気候データ

アンサンブル気候予測データベースである d4PDF はグ ローバル領域及び日本周辺のリージョナルりょういきに ついてそれぞれ 60km, 20km メッシュの解像度の大気モ デルを使用して解散された数値実験出力結果郡であり, 過去 6000 年分(リージョナル領域は 3000 年分),将来 については全球平均気温が産業革命以降 2℃ および 4℃ 上昇した気候状態についてそれぞれ 3240 年、5400 年分のデータが公開されている.また,昇温パターンが 6種,アンサンブルがそれぞれの昇温パターンにつき 15 種類ある.本研究では,4℃上昇した未来の気候情報を 用いる。

case	Event period(UTC)	Minimum Sea Level Pressure [hpa]	Maximum deepening rate [hpa/h]	ensemble number	temperature rise pattern
I -1	168h since 2053011000	963.96	1.33	m102	HFB_4K_CC
I -2	120h since 2054030800	969.41	2	m102	HFB_4K_CC
I -3	168h since 2056013100	975.51	1.22	m102	HFB_4K_CC
I -4	120h since 2060111300	975.94	1.68	m101	HFB_4K_CC
I -5	120h since 2070122400	968.53	2.48	m102	HFB_4K_CC
I -6	120h since 2059030700	986.62	1.54	m101	HFB_4K_GF
I -7	168h since 2063102500	968.85	2.54	m101	HFB_4K_GF
I -8	144h since 2064013000	968.93	1.69	m101	HFB_4K_GF
I -9	192h since 2085042400	971.81	1.16	m101	HFB_4K_GF
I -10	72h since 2055041500	984.43	1.55	m102	HFB_4K_GF
I -11	96h since 2076031500	964.76	2.81	m102	HFB_4K_GF
I -12	120h since 2076012400	981.013	1.48	m101	HFB_4K_HA
I -13	144h since 2077012300	975.73	1.74	m101	HFB_4K_HA
I -14	144h since 2051042300	972.76	1.57	m102	HFB_4K_GF
I -15	96h since 2085122200	967.93	2.91	m102	HFB_4K_HA
I -16	96h since 2098020200	963.95	2.22	m101	HFB_4K_MI
I -17	120h since 2054101100	971.2	1.77	m102	HFB_4K_MI
I -18	120h since 2056110900	981.07	2.1	m102	HFB_4K_MI
I -19	144h since 2073032000	965.15	2.33	m101	HFB_4K_MP

表2 本研究で計算を行った爆弾低気圧の情報

2.5 爆弾低気圧サンプル

一般的に爆弾低気圧は次式により表される 24 時間気圧発 達率 ε が 1hPa/hr を越えて急速に発達する温帯低気圧とし て定義される。

$$\varepsilon = -\frac{Pc(t+6h) - Pc(t-6h)\sin 60^{\circ}}{12} \quad (1)$$

ここで、Pcは、低気圧の中心気圧、tはその時の時刻、 ¢は、緯度を表す。二宮、森らのグループ(8)は九州 大学爆弾低気圧情報データベース(9)の方法に基き d4PDFの将来気候データから爆弾低気圧を抽出すると共 に、そのトラックデータを公開している。本研究ではそ れらのデータのうち TypeIII低気圧に相当し、且つその中 でも比較的勢力の強い19の爆弾低気圧を計算ケースと して抽出した(表3、図2参照)。それぞれ助走計算と して爆弾低気圧の発生時刻より40時間~60時間前を計算 開始時刻としている。



図2 本研究で計算を行った爆弾低気圧の経路

3.計算結果

3.1 高潮水位の平面分布

表-2に表す 19 ケースの計算結果から各ケースの最大高 潮高さを求め、そのケース間平均値及び標準偏差を求め た。なお水位は全て 2014 年根室高潮における最大気象潮 位である η_0 =1.6mにより無次元化している。

図-3(a)は本数値実験により得られた爆弾低気圧通過イ ベント期間における最大高潮水位の平均値の平面分布を 表す。また図 3-(b)には参考値として Saruwatari et al.(10) にて求められた過去に発生した TypeⅢ爆弾低気圧に起因 する高潮の平均最大水位の分布を表す。基本的には過去 の爆弾低気圧に起因する高潮水位の分布と同様に、Type Ⅲ低気圧の経路に沿って太平洋及びオホーツク海上で最 大水位は高くなる傾向にある。また北半球において爆弾 低気圧は北上しながら勢力を強めていくため、最大高潮 水位は北に行くほど高くなる。本計算の解像度では地形 的な吹き寄せ効果による湾地形内の水位上昇を十分再現 することはできないが、根室湾。仙台湾、東京湾など太 平洋側の主要な湾に相当する位置において平均水位の局 所的な増大が見られる計算グリッドがある。これについ てはネスティング計算の実施により計算結果の高解像度 化を図り、更なる検討を行う必要がある。

図4 (a) には各ケースの最大高潮水位の標準偏差の平 面分布を、また同図(b) に参考値として Saruwatari et al.(12)による過去の TypeIII爆弾低気圧に起因する高潮水 位の標準偏差分布を表す。低気圧経路直下の水位上昇量 は大きいのに加え少しの経路変化に敏感であるため、太 平洋及びオホーツク海上の TypeIII低気圧の経路に沿って 高潮水位の標準偏差が大きくなる。過去の水位上昇量の 標準偏差分布では特に根室湾内における標準偏差が大き くなる傾向が現れていたが、本研究の結果ではそれを解 像することはできていない。高潮被害が問題となるのは この様な湾内における局所的な水位の上昇現象であるた め、今後の高解像度数値実験の実施が求められる。



図3 最大高潮水位の平均値の分布



図4 最大高潮水位の標準偏差



図6 高潮最大水位の確率密度



3.2 沿岸地域における高潮水位

高潮被害発生の有無は沿岸部での水位上昇量により決定 される。そこで図―1内に示す様にユーラシア大陸東岸、 日本列島から樺太島の西岸と東岸に沿ってそれぞれ L1、 L2、L3 に沿った各ケースの最大高潮水位の中央値(黒 線)、パーセンタイル領域(ピンク)、パーセンタイル 領域(ブルー)を表す。L1 海岸は本研究で対象とした TypeⅢ低気圧の経路からは遠く最も高潮水位の中央値は 低い。杭州湾及び西朝鮮湾に相当する北緯 33 度、41 度 付近では高潮水位の10パーセントタイル値の顕著な上昇 が見られるが、このような大規模な湾では低気圧の通過 以外の要因でも大きく水位が変動し得るため、本研究で 対象とした爆弾低気圧の通過と直接関係はない。L2 海岸、 L3 海岸と、TypeIII低気圧の経路に近づくにつれて高潮水 位の中央値が徐々に大きくなっていく。特に L3 海岸では 北に行くほど高潮水位の10パーセントタイル値が増加し ており、日本列島の太平洋沿岸北部及びオホーツク海沿 岸における TypeⅢ低気圧に対する脆弱性が反映されてい る。

図-6は北西太平洋海域の主要な湾に相当する地点にお ける高潮最大水位の確率密度を表す。根室周辺や宗谷岬、 アニワ湾周辺等では確率最大水位が他のより南方、又は L1、L2 海岸上の地点よりも高く、本結果からも日本列島 の太平洋沿岸北部及びオホーツク海岸沿いの湾岸地形の 地点における高潮リスクの高さが示唆される。ただしこ れについても本数値実験でも湾地形を十分に理解できる 計算条件となっておらず、今後のより高解像度での数値 計算結果が求められる。

4,結論

本研究では TypeIII爆弾低気圧を対象として水位の評価を 行ったが本研究の解像度では、明示的な解析を行うこと は難しいことが判明したが、最大高潮水位が北に行くほ ど高くなる傾向を示していたり、高潮最大水位の確率密 度を比較した際、根室周辺や宗谷岬、アニワ湾周辺等で は、他の地点より確率最大水位が高く、湾岸地形の地点 における高潮リスクの高さが示唆されていたりと、これ からの研究に期待を持てる。

参考文献

(1)Yoshida&Asuma:"Monthlyweather

Review", https://doi.org/10.1175/1520-

0493(2004)132<1121:saseo>2.0,co;2,1121-1142,2014

(2)A.Saruwatari,K.Fukuha,Y.Watanabe:"Probabilistic

assessment of storm surge potential due to explosive cyclogenesis in the northwest Pacific region", COASTAL, 61, 4, 520-534, 2019.

(3)Ministry of the Environment;"Fifth Assessment Report Climate Change 2013(AR5)",2013

(4)高裕也、二宮順一、森信人; "大規模アンサンブル気候予測データを用いた爆弾低気圧の将来変化、土木学会論文集 B1(水工学)",74,4,pp.I 175-I 180

and

(5)Marshall, J., A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman,

C.Heisey(1997)A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers.J.Geophysical Res., 102(C3), pp5753-5766.

(6)Marshall,J.,C.Hill,L,Perelman,and

A.Adocroft,(1997)Hydrostastic,quasi-quasi-hydrostatic,and nonhydrostatic ocean modeling,J.Geophysical Res.,102(C3).pp5753-5752

(7),(10)A.Saruwatari,K.Fukuha,Y.Watanabe:"Probabilistic assessment of storm surge potential due to explosive cyclogenesis in the northwest Pacific region", COASTAL, 61,

(8) 二 宮 、 森 ら ; <u>http://www.coast.dpri.kyoto-</u> <u>u.ac.jp/japanese/page_id=5004</u>

(9)"http://fujin.geo.kyushu-u.ac.jp/