気候変動に伴う可能最大高潮の不確実性の評価に関する研究

Uncertainty of Possible Maximum Storm Surge Projection Associated with Climate Change

林 祐太¹・安田誠宏²・森 信人³・中條壮大⁴・間瀬 肇⁵

Yuta HAYASHI, Tomohiro YASUDA, Nobuhito MORI, Sota NAKAJO and Hajime MASE

Although evaluation of possible maximum storm surge risk is important in a long-term design of coastal defence structures, the storm surge risk depends not only on typhoon's intensification but also on typhoon's track shift due to climate change. This study investigates uncertainty of possible maximum storm surge projections. Effects of model parameters, such as sea surface drag coefficient, radiation stress, and climate change effects on potential storm surge magnitude in Ise Bay were analysed. Numerical results indicate that an empirical typhoon model with proper parameterization of the bulk flux is reasonable comparing with mesoscale downscaling results, and also demonstrated that not only typhoon track's shift but also typhoon's translation angle against the bay shape is important in projections of possible maximum storm surge.

1. 緒 論

近年、全球気候モデルGCMによる結果を用いて、様々な気候変動の影響評価研究が進められている。GCMやRCMなどの高解像度気候モデルによる予測実験では、気候変動に伴い、全球での熱帯低気圧の発生頻度は減少するが、強度は増大することが示されている (Knutsonら, 2010)。さらに、北西太平洋、なかでも日本付近で台風強度の変化により風速の極値が増大すると予測されている (Moriら, 2010)。日本沿岸においては、台風強度の増加により、高潮による災害の甚大化が懸念される。

護岸設計における設計潮位は、既往最高潮位、または最悪コースを通る伊勢湾台風級の台風を外力として推算された高潮偏差に期望平均満潮位を足し合わせたもののいずれか大きい方が用いられる。将来の高潮を予測する場合、GCMのモデル間の差や解像度、温室効果ガス排出シナリオなどの種々の要因によって、予測結果には不確実性が含まれる。特に台風のような複雑な構造をもつ気象擾乱を再現するためには、GCMは最低でも数十km程度の水平分解能を要する。安田ら (2011) は、最新の予測実験結果を直接外力として用いて、日本沿岸の高潮の将来変化を求めているが、1つのGCMモデルと1つのCO₂排出シナリオに基づいた結果であるため、湾スケールの不確実性の評価をするまでには至っていない。将来気候下における高潮の可能最大値を求めること (吉野ら, 2009; 林ら, 2011; 村上ら, 2011) は、長期的な護岸設計において重要であるが、考慮すべき対象が多岐にわたる。

高潮は単に台風強度の将来変化だけでなく、台風がどのような経路をとるかにより大きく変化する。さらに、高潮推算においても、用いる数値計算モデルやモデルパラメータ、外力となる気象場などによって推算結果に差が生じる。可能最大高潮の推定および将来高潮変化予測を行うには、これらをすべて踏まえる必要がある。

本研究では、伊勢湾を対象として、高潮計算モデルと台風特性が可能最大高潮予測に係る不確実性について評価する。

2. 検討手法および条件

高潮予測の不確実性に影響を及ぼす要因として、1) 高潮計算モデルと2) 台風特性が考えられる。高潮モデルによる不確実性としては、a) 計算格子解像度、b) ラディエーションストレス、c) 入力気象場、d) 海面抵抗係数が考えられる。台風特性による不確実性としては、e) 台風経路 (平行移動と回転)、f) 台風の移動速度、g) 気候変動に伴う台風強度の将来変化が考えられる。これらの項目を変えて計算を実施し、結果の差異を評価する。

計算には、高潮・波浪結合モデルSuWAT (Kimら, 2008)を用い、伊勢湾台風を対象として、上記のa)～g)の7つの要因について定量的な評価を実施した。

(1) 高潮計算モデルの不確実性

a) 格子解像度

高潮の発生機構のひとつである吹き寄せ効果は、水深に反比例するので、高潮は水深変化に鋭敏に反応する。さらに、東京湾、伊勢湾のような内湾は、複雑な海岸線かつ海底地形を有しているため、高潮推算を行う上で、ある程度の解像度で地形を適切に表現することが必要である。計算条件としては、入力気象場に伊勢湾台風の詳細気象予測値 (別所ら, 2010)、海面抵抗係数にJanssen

1 正会員	修(工)	五洋建設株式会社
2 正会員	博(工)	京都大学助教 防災研究所
3 正会員	博(工)	京都大学准教授 防災研究所
4 正会員	博(工)	熊本大学助教 工学部社会環境工学科
5 正会員	工博	京都大学教授 防災研究所

による波齢に依存した海面抵抗係数, 波浪モデルと結合してラディエーションストレスを考慮する。

b) ラディエーションストレス

波浪モデルとの結合によるラディエーションストレスの影響が高潮推算値に影響を及ぼすことは, 柴木ら(2001)やKimら(2010)によって高知海岸を対象に示されているが, ここでは伊勢湾における影響を確認する。計算条件としては, 詳細気象予測値を入力気象場とし, 海面抵抗係数については, 波浪モデルとの結合の場合はJanssenの海面抵抗係数を, 結合しない場合は本多・光易式を用いる。

c) 入力気象場

間瀬ら(2011)は, 別所ら(2010)がJRA-55を気象庁非静力学モデル(NHM)によりダウンスケールした詳細気象予測値を用いて, 伊勢湾台風高潮の再現実験を行っている。ここでは, 間瀬ら(2011)の結果と経験的台風モデル(Myers式および藤井・光田(1986)のSGW)を入力気象場とした高潮推算結果を比較する。波浪モデルを結合して計算を行い, Janssenの海面抵抗係数を用いる。

d) 海面抵抗係数

モデル内のパラメータの設定によって高潮推算結果に違いが生じる。海面抵抗係数 C_D の違いによる高潮推算への影響をみるために, 海面と波浪の相互作用を考慮した C_D と本多・光易式(1980)およびGarraatt(1977)の経験式で求められる C_D を与えた計算をそれぞれ実施する。

(2) 台風特性の不確実性

a) 台風経路

台風経路が高潮に及ぼす不確実性について評価するため, 伊勢湾台風を平行・回転移動させた経路を用いて高潮推算を行い, 名古屋港に対する危険経路および高潮の可能最大値を求める。平行移動については, 元の経路データから東を正として, $-30 \sim +50$ kmの範囲で5 kmずつ移動させる。回転移動については, 名古屋港を中心として, 反時計回りを正として, $-30^\circ \sim +30^\circ$ の範囲で 5° 刻みで回転操作を行う。回転中心を名古屋港としたのは, 経験的台風モデルでは, 台風中心を原点として台風の進行方向を座標軸としたとき, 同じ座標では同じ風速・気圧が推算され, 風向のみが変わる性質を利用するためである。海面抵抗係数には, 3. (4)での検証結果より, $U_{10} \geq 30$ m/sの C_D を一定とする条件を, 最適条件として用いる。

b) 移動速度

台風の移動速度の変化に伴い, 風速も変化する。また, 移動速度が湾固有の長波の速度と等しくなる場合, 共振が発生する。伊勢湾台風の移動速度を上陸直前の1959年9月26日15時(JST)から台風が通過するまで変化させる。元の伊勢湾台風の移動速度を1/6, 1/3, 1/2, 2, 3倍と変化させて高潮計算を行う。

c) 台風強度の将来変化

気候変動による台風強度の将来変化を考慮するために, 4. (1)の検討で得られる危険経路に, 台風強度の将来変動予測値を加味した高潮計算を行う。経験的台風モデルでは中心気圧に応じた風速場が求められるため, 台風強度の変化は中心気圧で表わせるものとして, 中心気圧のみを変化させる。中心気圧の将来変化は, 気象研究所(Kitohら, 2009)のCMIP5全球大気モデルの2モデルとCMIP3の中から6モデルを用い, 緯度依存する中心気圧の将来変化傾向 Δp [hPa] (Mori, 2012)を上乗せする。将来気候下の極端な例を想定するために, 将来変化傾向の標準偏差 σ [hPa]を Δp に加えた場合も検討し, 中心気圧の将来変化の不確実性についても考慮する。

3. 計算モデルが高潮予測に及ぼす不確実性

(1) 格子解像度

格子解像度が高潮推算精度に与える影響を評価する。名古屋港と四日市, 前芝においては時系列で潮位偏差の観測値があるので時系列で計算結果と比較し, 松坂と鳥羽における観測値は最大潮位偏差のみであるため, 最大潮位偏差は5地点すべてで比較する。

名古屋における計算結果の潮位偏差の時系列を図-1に示す。横軸は時間(JST), 縦軸は潮位偏差[m]である。また, 黒は観測値で, 緑, 青, 赤はそれぞれ第1, 2, 3領域の計算結果を示している。黒線が途切れているのは, 観測値が欠損しているためである。格子解像度による計算結果の差異は顕著であり, 解像度500 m, 1 km (青, 赤)と5 km (緑)を比較すると, ピーク到達時刻に約1~2時間ほどの差がある。最大潮位偏差にも顕著な差があり, 解像度500 mと5 kmでは約1.0 mの差がある。ピーク到達前の前駆的な高潮の再現性が良くないが, これは, 入力気象場である詳細気象予測値が, ピーク到達前の12時間前からしかないのである。Forerunnerの影響と考えられる。

次に, 最大潮位偏差の解像度による違いをみる。最大潮位偏差の観測値と計算値を比較したものを図-2に示す。湾口に近い鳥羽や松坂に比べて, 湾奥にある名古屋

図-1 格子解像度の違いによる高潮偏差の時系列(黒:観測値, 緑:解像度5 km, 青:解像度1 km, 赤:解像度500 m)

図-2 格子解像度の違いによる最大高潮の観測値と計算値の比較 (●:鳥羽, ▲:松坂, ◆:四日市, ★:前芝, ■:名古屋. 緑:解像度5km, 青:解像度1 km, 赤:解像度500 m)

図-3 波浪モデル結合の有無による最大高潮偏差の差 (波浪モデル結合あり-結合なし)

では格子解像度の影響がより大きい。名古屋では0.9 mの差があるが、四日市や前芝、松坂、鳥羽では0.3~0.1 m程度であった。

(2) ラディエーションストレス

図-3に波浪モデルの結合の有無による最大潮位偏差の差の平面分布を示す。波浪モデル結合ありの場合、ラディエーションストレスが考慮される。値は波浪モデル結合ありの結果から結合なしの結果を差し引いた値である。その差は、湾口から湾奥に向かうほど大きくなり、伊勢湾の湾奥では推算結果に1.2~1.75 mの差が生じる。

(3) 入力気象場

名古屋での高潮偏差の時系列を図-4に示す。横軸は時間 (JST)、縦軸は潮位偏差である。黒は観測値、赤は詳細気象予測値による間瀬らの計算値、青は経験的台風モデルによる計算値である。詳細気象予測値による最大高潮偏差の値は、観測値とほぼ一致している。一方、経験的台風モデルによる計算値は、名古屋で最大値が約5.9 mとなっており、推算精度は良くない。ピーク到達前の潮位偏差についても、経験的台風モデルによる結果は過小評価している。経験式による C_D は伊勢湾台風のような高

図-4 入力気象場の違いによる名古屋での高潮偏差の時系列比較 (黒:観測値, 赤:詳細気象予測値 (NHM), 青:経験的台風モデル (SGW))

図-5 海面抵抗係数の違いによる名古屋での高潮偏差の時系列比較 (黒:観測値, 赤:波浪と海面の相互作用を考慮した C_D (図-4のSGWに相当), 緑:本多・光易式, 紫: Garratt (1977) による経験式)

風速時に過剰な運動量を与えること、陸上地形の影響が含まれないことが原因と考えられる。最大潮位偏差の推算結果の差を平面的にみると、湾奥以外はそれほど差がないが、湾奥においては非常に差が大きくなった。

(4) 海面抵抗係数

経験的台風モデルに対して C_D の条件を変えて計算した名古屋における結果を図-5に示す。青系の線は、海上10m風速 U_{10} がある値以上のときに C_D を一定とした場合の結果である。波齢に依存するJanssenの海面抵抗係数と本多・光易式の結果を比較すると、最大潮位偏差はかなり異なり、Janssenの方が1.45 m大きく、かなりの過大評価になった。観測値と比べて最もピーク値が近かったのは、本多・光易式で $U_{10} \geq 30$ m/sの C_D を一定とした場合であった。経験的台風モデルでも、バルクフラックスのパラメタリゼーションを適切に与えると、ある程度の精度が確保できることがわかった。

4. 台風特性が高潮予測に及ぼす不確実性

(1) 台風経路

図-6に、東に最大風速半径の+18.5 km平行移動し、回転角度を変化させた場合の最大潮位偏差と経路の関係を示す。東に+18.5 km移動し、反時計回りに+20°回転した場合が、伊勢湾にとって最も危険な経路となり、最大高潮偏差は4.76mとなった。伊勢湾台風が元の経路を辿ったときと比べると1.34 m、伊勢湾台風経路を単に+18.5

図-6 最大潮位偏差と台風経路の関係（色は名古屋港最大潮位偏差，丸付きの線：危険経路）

図-7 3次多項式近似による平行移動距離・回転角度に伴う最大潮位偏差の変化（横軸：平行移動距離（東を正），縦軸：回転角度（反時計回りを正））

km平行移動した場合よりも0.40 m増加した。図示しないが，平行移動だけなら，+25km移動した場合の方が，気圧が4 hPa低くなるために偏差が0.8m大きくなるが，回転を加味すると，+18.5kmと+20°が最悪条件となった。

経験的台風モデルの台風経路を平行・回転移動したときの最大潮位偏差の計算結果に3次多項式近似を適用して図示したものが，図-7である。元の経路よりある程度東に移動した方が，最大高潮偏差が極大値をとる。これは，経路を東に平行移動した場合，伊勢湾上空の気圧が低下し，風速も増加することによるものである。一方で，回転角度が正方向（反時計回り）に大きくなれば，潮位偏差のピーク値は大きくなる。これは吹きこみ角度の変化による吹送距離の変化によるものである。

可能最大高潮を考える際，経路を平行移動させるだけでなく，経路を回転させて湾軸に対する進行方向を変えることも，考慮すべき重要な要因であることがわかった。

(2) 台風移動速度

図-8に名古屋港における計算結果を示す。黒は移動速度変化をさせない場合，つまり元の伊勢湾台風経路によ

図-8 台風速度の違いによる名古屋における高潮偏差の時系列比較（黒：移動速度変化なし，青系：移動速度減少，赤系：移動速度増加）

図-9 危険経路に将来変化傾向を与えたときの中心気圧（横軸：中心気圧，縦軸：台風中心位置の緯度）

図-10 危険経路に想定した将来の中心気圧変化を与えた時の名古屋における高潮偏差の時系列

る結果，青系の色は移動速度を減少させた場合，赤系の色は移動速度を増加させた場合である。図より，移動速度の増加に伴い，高潮偏差は増加することがわかる。それぞれ，1.53 m，1.74 m，2.05 m，4.49 m，4.62 mであり，移動速度を3倍に変化させた時の高潮偏差が最も大きかった。移動速度を減少させた時は，速度を変化させない場合と比較すると高潮偏差は減少するが，高潮位の継続時間は長くなるため，満潮と重なる可能性が高くなる。台風通過直後の潮位偏差の振動に着目すると，理論通り移動速度が大きくなるにつれて振動幅は大きくなり，移動速度が小さくなるにつれて振動は小さくなる。

(3) 台風強度の将来変化

最後に，気候変動に伴う台風強度の変化を考慮した計算を行った。台風強度の変化は中心気圧で表わせるもの

表-1 計算モデルによる高潮偏差の変動量

	格子解像度	ラディエーションストレス	入力気象場	海面抵抗係数
高潮変動量	名古屋：0.9 m それ以外：0.3～0.1 m	1.2～1.75 m（伊勢湾奥） 0.9～1.1 m（三河湾奥）	2.0 m（経験的台風モデル 再解析値）	1.45 m（Janssen－本多・光易）

表-2 台風特性による高潮偏差の変動量

	経路の東西位置	経路の方位	移動速度	気候変動による中心気圧
高潮変動幅	-1.37～1.02 m（-30～50 km）	-0.67～0.40 m（-30°～+30°）	-1.89～1.20 m（1/6～3倍）	0.43～0.93 m（mean, +1～3 σ ）
最大値・条件	4.76 m, 東方向へ+18.5 km&反時計回りに+20°		4.62 m, 3倍	5.69 m, - Δp -3 σ [hPa]

として、中心気圧のみを変化（減少ならびに増加）させた。緯度依存する中心気圧の将来変化傾向 Δp [hPa]を考慮し、将来気候下の極端な例を想定するために、将来変化傾向の標準偏差 σ [hPa]の変化も上乘せした。

図-9に危険経路の中心気圧に将来変化傾向を上乘せした結果を、図-10に高潮計算結果を示す。かなり極端に3 σ 変化させた場合、中心気圧が約20 hPa低くなり、強度変化がない場合より、高潮偏差は4.76mから0.93 m増加し、5.69 mとなった。予測変動幅は0.43～0.93 mである。

5. 結 論

各検討要因に対して変動した高潮偏差を、表-1および2にまとめて示す。

(1) 計算モデルが高潮予測に及ぼす不確実性

格子解像度や計算格子、ラディエーションストレス、入力気象場、海面抵抗係数による高潮偏差に及ぼす不確実性を評価したところ、海面抵抗係数と気象場が高潮偏差に及ぼす影響が大きいことがわかった。

(2) 台風特性が高潮予測に及ぼす不確実性

経験的台風モデルによって、伊勢湾台風経路の平行・回転移動を施し、高潮計算を行った結果、一番大きい最大高潮偏差を引き起こしたのは、湾軸と平行に移動する経路であり、最大で+1.34 mであった。移動速度は速くなればなるほど高潮は大きくなり、最大で+1.20 mであった。一方、気候変動予測実験結果に基づいて、台風中心気圧の将来変化を強めに考慮した場合の最大値は+0.93 mであった。台風強度の変化による影響よりも、台風経路のインパクトの方が大きいことがわかる。

以上のように、高潮偏差に及ぼす不確実性の要因として、インパクトの大きいものは、入力気象場、海面抵抗係数、台風経路、速度であることがわかった。今後、高潮に及ぼす気候変動の影響、特に可能最大値を考える上で、台風強度の将来予測と共に、個々の湾における台風経路の不確実性の評価が重要であることを示した。

謝辞：本研究は、文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム、科学研究費補助金の交付を受けて行った成果であることを明記し、ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 柴本秀之・加藤史訓・山田浩次（2001）：密度成層と wave setup を考慮した土佐湾異常高潮の推算，海岸工学論文集，第48巻，pp.286-290.
- 藤井 健，光田 寧（1986）：台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション．京都大学防災研究所年報，Vol. 29，No.B-1，pp.229-239.
- 別所康太郎・中澤哲夫ほか10名（2010）：伊勢湾台風再現実験プロジェクト（情報の広場），天気，Vol.57，No.4，pp.247-254.
- 本多忠夫・光易 恒（1980）：水面に及ぼす風的作用に関する実験的研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp.90-93.
- 間瀬 肇・武藤遼太・森 信人・金 洙列・安田誠宏・林祐太（2011）：詳細気象予測値を用いた伊勢湾台風高潮の再現実験，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67，No. 2，pp.I_401-I_405.
- 村上智一・深尾宏矩・吉野 純ほか3名（2011）：温暖化による台風強化に伴う東京湾での最大級高潮と波浪の時空間分布，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67，No. 2，pp.I_396-I_400.
- 安田誠宏・中條壮大・金 洙列・森 信人・間瀬 肇・Kevin Horsburgh（2011）：気候変動予測実験出力を直接用いた高潮リスクの評価，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67，No. 2，pp.I_1171-I_1175.
- 吉野 純・小林孝輔・児島弘展・安田孝志（2009）：大気・海洋力学的手法に基づく伊勢湾の可能最大高潮・波浪の評価，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 65，No. 1，pp.396-400.
- Garratt, JR.(1977): Review of drag coefficients over oceans and continents, *Monthly Weather Review*, Vol. 105, No. 7, pp.915-929.
- Kim, S. Y., Yasuda, T. and Mase, H.(2008): Numerical Analysis of Effects of Tidal Variations on Storm Surges and Waves, *Applied Ocean Res.*, Vol. 30, pp.311-322, doi:10.1016/j.apor.2009.02.003.
- Kim, S. Y., Yasuda, T. and Mase, H.(2010): Wave set-up in the storm surge along open coasts during Typhoon Anita, *Coastal Eng.*, Vol. 57, pp. 631-642, doi:10.1016/j.coastaleng.2010.02.004.
- Kitoh A, Ose T, Kurihara K, Kusunoki S, Sugi M, KAKUSHIN Team-3 Modeling Group (2009): Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program, *Hydrological Res. Letters*, 3, pp.49-53. doi:10.3178/hrl.3.49.
- Knutson T.R., McBride J.L., Chan J., Emanuel K., Holland G. et al. (2010): Tropical cyclones and climate change, *Nature Geoscience*, 3, pp.157-163, doi:10.1038/NCEO 779.
- Mori, N., Yasuda, T., Mase, H., Tom, T.H., Oku, Y.(2010): Projection of Extreme Wave Climate Change under Global Warming, *Hydrological Res. Letters*, 4, pp.15-19, doi:10.3178/HRL. 4.15.
- Mori, N. (2012): Projection of Future Tropical Cyclone Characteristics based on Statistical Model, In *Cyclones Formation, Triggers and Control*, Nova Science Publishers, Inc., 24p.