# 最大規模の高潮を発生させる台風経路の選定方法の検討 PROPOSAL OF A SIMPLIFIED METHOD FOR ESTIMATING A TYPHOON TRACK CAUSING A LARGE STORM SURGE

小園 裕司\*•櫻庭 雅明\*\*•野島 和也\*\* Yuji KOZONO, Masaaki SAKURABA and Kazuya NOJIMA

In order to set up the conditions of typhoon for which the largest storm surge occurs, it is important to identify not only the central pressure and radius but also the track of the typhoon. The sensitivity analysis of the tide level deviation was estimated in several model topographies using numerical simulation. The simulation was applied locally as well for grasping the trend. As a result, the actual trend of the tide deviation in the field was in good agreement with that of the numerical experiment. The proposed method has been shown to be useful for setting of the typhoon track causing a large storm surge.

Keywords : tide level, storm surge, numerical simulation, typhoon model, typhoon track

### 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波では、想定を超える津 波が東北地方を襲い、沿岸域では甚大な被害が生じた。こ れを契機に科学的知見を踏まえた最大クラスの津波について 検討されていくこととなった。現在津波に限らず洪水や高潮に おいても、最大規模の浸水想定の検討が進められている。特 に高潮においては、地方自治体のハザードマップ整備率は約 18%(平成30年6月時)にとどまっており、浸水想定、ハ ザードマップの整備・見直しが急務となると考えられる。

国、地方自治体や関係機関では、「高潮浸水想定区域図 作成の手引き」<sup>1)</sup>(以下、手引き)に基づき、高潮浸水想定 の検討が進められている。想定する台風の気圧、台風半径、 移動速度は、1934年室戸台風、1961年第二室戸台風や、 1959年伊勢湾台風等の観測値に基づき、最大規模の台風と なるように設定(例えば、台風半径75km、台風の移動速度 73km/h)されており、経路は、過去に大きな潮位偏差を生 じた台風の経路を参考に複数の経路を設定することが示され ている。最悪のシナリオを想定する上では、台風の規模(中 心気圧、台風半径、移動速度)のみならず、台風経路も重 要な要因となるため、各地域海岸において、最も潮位偏差が 大きくなるような経路を選定することが重要である。既往研究に おいても、経路(方向、平行移動)についての検討が行わ れ、最大潮位偏差が生じる経路設定がなされてきた。例えば、 澁谷ら<sup>2),3)</sup>は、伊勢湾に位置する名古屋港や大阪湾を対象 に、台風経路の平行・回転移動が高潮に及ぼす影響を評価 し、最悪シナリオの経路群を選定した。竹下ら4)は、全国12 箇所の海岸を対象に、高い潮位偏差を発生させる経路を選定 した。既往台風経路を参考に、海岸ごとに代表的な3方向の 経路を設定し、それぞれ3平行移動した経路(計9ケース) の台風経路を対象として、最大潮位偏差を発生させる経路を 選定している。宇都宮ら5)は、台風常襲地帯である志布志港 に着目し、竹下らと同様に、代表的な進行方向を3つに絞っ た条件下で、平行・回転移動をケーススタディしながら経路を 選定した。いずれの報告も、当該地域海岸に有用な情報を得 ており、今後の当該地域における高潮検討を行う上では重要 であると考えられる。しかし、今後全国で同様の検討を行うに は、これらの手法は多大なる時間と計算コストを要する。その ため、高い潮位偏差を発生させる台風経路を簡易的かつ様々 な海岸にも適用できるなど、汎用的に推定する手法の確立が 求められる。

本研究では、汎用的かつ簡易的に高潮潮位偏差が最大と なる台風経路を推定する手法を求めることを目的として、高潮 シミュレーションモデルを用いて海岸形状と台風経路の違いに よる潮位偏差に関するケーススタディを実施し、台風経路と海 岸地形ごとの潮位偏差の関係を明らかにした。また、本検討 で実施した数値実験の傾向が、実地形においても適用可能か 検証した。

<sup>\*</sup> 技術本部 中央研究所 総合技術開発第1部

<sup>\*\*</sup> 技術本部 先端研究開発センター





図-1 モデル地形の概要 (上:モデル地形の水深作成のために抽出したライン、左下: 計算領域、右下:縦断地形)



図-2 類似化した海岸のモデル地形

# 2. モデル地形を用いた数値実験

#### (1) 解析モデルの概要

本検討で用いた高潮シミュレーションモデルは、非線形長 波式にコリオリカ、気圧による吸い上げ、風による海面摩擦、 砕波に伴う Wave Set-up を考慮したモデルを用いた。式(1) ~(3)に連続式と運動方程式を示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$
(1)
$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D}\right)$$

$$= fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) - \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right)$$
(2)
$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D}\right)$$

$$= -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sy} - \tau_{by}) \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right)$$
(3)

ここで、 $\eta$ は静水面からの水位変化量、gは重力加速度、  $\rho_w$ は海水の密度、Pは海面での大気圧、fはコリオリ係数、Dは全水深である。 $\tau_{sx}$ 、 $\tau_{sy}$ は海面せん断応力、 $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$ は底面 せん断応力、 $S_{xx}$ 、 $S_{xy}$ および $S_{yy}$ はラディエーションストレスで ある。底面せん断応力はマニング則で評価し、海面せん断応 力は本多・光易による式<sup>6)</sup>で評価した。なお、浸水計算等の 詳細な検討で Wave Set-up の評価も必要と考えられるが、本 検討では、最大潮位偏差を発生させる経路を簡易的に推定す ることを目的としていることから、Wave Set-up(ラディエーショ ンストレス)は考慮しないものとした。気圧場および風場推算 には式(4)に示す Myers 式を用いて算定した。

$$P_{(r)} = P_{c} + \Delta P \exp\left(-\frac{r_{0}}{r}\right) \tag{4}$$

rは台風中心からの距離、 $P_{(r)}$ は地点における気圧、 $P_{(c)}$ は台風中心の気圧、 $\Delta P$ は台風の中心示度、 $r_0$ は台風半径 (最大旋衡風速半径)である。傾度風の風向を台風の中心方 向に 30 度とした。また、Myers 式より算定した風速から海面 上 10mの風速への変換係数は 0.7 とした。

なお、本高潮モデルは、各種研究機関の既往検討により再 現性や精度が十分確認されているため、本稿ではモデルの検 証等は実施しないものとする。

## (2) 数値実験の検討内容

本検討では、代表的な海岸地形を参考にモデル地形を作成 し、各モデル海岸に対して台風経路の違いによる潮位偏差の 感度分析をした。海岸地形は、外洋に面している代表的な海 岸地形として、湾なし(日向灘沿岸のように海岸線に湾等を有 していない海岸地形)、開口部が狭窄となっている湾(伊勢湾 や東京湾など)、開口している湾(宮古湾など)を参考にした。 データの作成方法および台風経路の条件については後述する。



図-3 台風経路の定義

表 —	1	<u></u> =+	笛	冬	侳
11 -		āΙ	异	木	

項目	条件			
計算領域: 計算格子幅 (分割数)	領域 1: 2,430m (720×540)			
	領域 2: 810m (1,496×986)			
基礎方程式	非線形長波方程式(コリオリカ、気圧吸 い上げ、吹き寄せ考慮)			
計算手法	リープフロッグ法 スタッガード格子			
水深条件 (海底勾配)	広域から沿岸:日本周辺の水深の平均 (汀線から 200km まで 1/50 それ以降 1/800) 海岸付近:図-2 参照			
粗度係数	一律 0.025			
領域境界条件	沖側:自由透過 陸域:反射境界 領域間:ネスティングによる接続			
台風外力	気圧:900hPa、半径:75km 移動速度:73km/h			
台風経路	以下1)と2)の組み合わせ(計1,845経路) 1) 進入角度:海岸線に対して0~180 度の範囲で4度ずつ回転 2) 平行移動:-100~100kmの範囲で 5kmずつ平行移動			
潮位条件	T.P.+ 0.0m			

#### (3) 数値実験の検討条件

本検討で数値実験を行ったモデル地形の計算範囲および 水深データの概要を図-1、図-2に示す。高潮の潮位偏 差と計算格子幅の精度検証がされている既往研究<sup>7)</sup>を参考に 沿岸域の計算格子幅は810mとした。広域では2,430m間 隔の計算格子幅とし、両計算領域はネスティングによって接続 させ計算した。モデル地形の水深は、日本列島周辺におけ る複数地点の汀線からの海底縦断を整理し(図-1上段図: 抽出ライン、下段右図の灰色丸:抽出した水深値)、その結 果を踏まえて、汀線から200kmまでを1/50勾配、それ以降 は 1/800 勾配とした。海岸の平面形状は、海岸の平面形状 に湾なし、閉鎖性湾、開放性湾(以下、モデル地形1、2、 3とする)を作成した。モデル地形2、3の形状・水深は、 東京湾、伊勢湾、大阪湾などの日本の主要な湾を参考に、 幅 27km、奥行き 55km とし、平均水深 22m とした。モデル 地形2の狭窄部の幅は主要な湾の形状を参考に11kmとした。 モデル地形 2、3の開口部(水深 22m)と両側海岸(水深 0m)との接合部は段落ち形状としている。なお、水深データ の整理では内閣府中央防災会議「南海トラフ巨大地震モデル 検討会」<sup>8)</sup>の水深メッシュデータを用いた。台風の外力規模は、 手引きにならって最大級の台風を想定し、中心気圧 900hPa、 台風半径 75kmとした。台風の移動速度は 73km/hで一定 とした。台風の経路は、図-3に示すように台風の侵入角度 を海岸線と平行な軸に対して $0 \sim 180$ 度の範囲で $\theta_{typ}$ ずつ、 さらに、評価地点を中心に平行移動量 R ずつ変化させた直 線台風経路を設定した。なお、 $\theta_{typ}$ は4度ずつ、Rは最も強 風となる半径(台風半径:75km)を包括するように-100~ 100kmの範囲で5kmずつ変化させた。これら進入角度と平 行移動の組み合わせで計 1,845 経路を設定した。各モデル 地形の潮位偏差の評価位置は図-1、図-2中に示す通り汀 線付近、または湾奥の P1 ~ P3 の地点で評価した。主要な 計算条件一覧を表-1に示す。

## (4) 検討結果

図-4に本数値実験より得られた、評価地点で潮位偏差 が最大となる経路の潮位偏差と風速の分布を示す。いずれの ケースも台風中心の東側で大きな潮位偏差が生じている。モ デル地形1では、汀線付近で1m以上の潮位偏差が発生し ている。モデル地形2では、汀線付近の湾口ではモデル地 形1と同様に1m程度の潮位偏差が生じているが、湾奥で は、風の吹き寄せによって、3m以上の潮位偏差が発生する ことが確認された。

図-5は各モデル地形における台風の $\theta_{bp}$ , R、最大潮位 偏差( $\eta_max$ )の分布を示している。モデル地形1では、R =約・25km、 $\theta_{bp}$ =約90度の場合が最大となり、1.2m程度 となることが確認された。中心気圧が900hPaで気圧の吸い 上げだけであれば約1.1mとなるはずであるが、風の吹き寄せ が生じても、あまり大きな潮位上昇は生じない。モデル地形1 では海岸形状に起伏がないため、風によって発生する吹き寄 せが海岸線軸方向に分散され、吹き寄せによる効果は小さい ことが考えられる。潮位偏差の分布の傾向は、R=約・25km、  $\theta_{typ}$ =約90度付近に近づくにつれて潮位偏差も大きくなると いった傾向を示した。湾形状となるモデル地形2では、R= -55km、 $\theta_{typ}$ =約92度付近で最大潮位偏差が生じており、 最大 5m 弱となっている。試算上気圧による吸い上げ効果は、 最大でも約1.1m程度が上限であることから、風による吹き寄 せ効果が大きいことが確認された。モデル地形1の傾向と異



図-4 上陸直後の潮位偏差および風速ベクトル (左段:モデル地形1、右段:モデル地形2)



図-5 各モデル地形における進入角度、平行移動距離および潮位偏差の分布 (左:モデル地形1(P1地点)、中央:モデル地形2(P2地点)、右:モデル地形3(P3地点))

なり、高い潮位偏差を発生させる分布が広いことが確認された。 例えば、ピークの偏差は、R = -55km、 $\theta_{typ} = 約92$ 度である が、R = -75km、 $\theta_{typ} = 120$ 度やR = -25km、 $\theta_{typ} = 75$ 度に もピーク偏差と同程度の潮位偏差が生じている。本検討では 台風の傾度風を30度と設定しており、台風の進入角度120 度、移動距離をR = -75kmとした場合、最も強い風が湾口に 対して直角方向に発生するため、高い潮位偏差を発生させた と考えられる。モデル地形3もモデル地形2の結果と同様に 高い潮位偏差を発生させる範囲が広くなっている。ピーク偏差 はモデル地形2より0.5m程度高くなっている。湾口が開いて いるため、外海から湾内に向かって多くの流入が生じるためで あると考えられる。

以上の数値実験の結果、海岸線の形状に湾等の起伏を有 していないモデル地形1では、台風の東側で海岸線に対して 直角に進入する経路( $R = 約 \cdot 25 \text{km}$ 、 $\theta_{typ} = 約 90 \text{ g}$ )が 大きくなること、湾を有している場合、一定の台風条件では あるものの、複数の経路(R = -75 km、 $\theta_{typ} = 120 \text{ g} \sim R = -55 \text{ km}$ 、 $\theta_{typ} = 約 92 \text{ g} \sim R = -25 \text{ km}$ 、 $\theta_{typ} = 75 \text{ g}$ )が高い 潮位偏差を発生させる傾向にあることを明らかにした。

#### 3. 実地形を対象とした検証

#### (1) 検討内容および条件

複雑な海岸地形、海底勾配を有する実地形において、数 値実験の結果より最大潮位偏差を発生させる台風経路が推定 可能かどうかを確認するために、モデル地形1と類似してい る宮崎県新富町と、モデル地形2と類似している名古屋を対 象に実地形計算した。名古屋が位置する伊勢湾の概要を図 -6に示す。台風の海岸線への進入角度と平行移動量を用 いてモデル推定値を算定し、実地形での計算値で潮位偏差 の比較・確認した。台風経路は、次の2種類の経路を設定し た。1つ目は、数値実験と同様に、異なる進入角度と平行移 動量を設定した複数の直線経路とした。2 つ目は、沿岸到達 まで経路の屈折等が含まれる既往の台風経路を設定した。既 往台風経路は1951~2018年までの観測された台風<sup>9),10)</sup>で 宮崎県新富町と名古屋に接近した経路の内、海側から陸側に 上陸した台風を対象にした(新富町:10経路、名古屋:21 経路)。図-7、図-8に検討対象とした台風経路の一例を 示す。直線経路については本解析で設定した複数の経路の



図-6 伊勢湾の概要



図-7 実地形計算における台風経路(直線経路の一例)



図-8 実地形計算における台風経路(既往台風経路の一例)



図-9 既往台風経路の進入角度と平行移動量の定義

内、最大となる経路を示している。台風の外力規模は、中心 気圧 900hPa、台風半径 75km としている。計算領域と地形 条件は南海トラフ巨大地震モデル検討会のメッシュデータを用い、領域1(2,430mメッシュ)と領域2(810m)とした。メッシュデータの詳細な格子数、領域範囲等の詳細は参考文献7)を参照されたい。

数値実験の結果より算定するモデル推定値の算定には、台 風の進入角度と平行移動量が必要となる。図-9に示すとお り台風の進入角度は、評価地点または湾ロ入り口を中心に 半径100kmの円を作成し、円と台風が交わる2点間(図中 C1、C2地点)を結んだ直線と海岸線がなす角度とした。平 行移動量は、2点間の直線と海岸線の交点を求め、交点と評 価地点までの距離を算定した。これら進入角度と平行移動量 を与条件に推定値を算定した。

#### (2) 検討結果

図-10、図-11に、新富町および名古屋において、直 線経路の台風で最も潮位偏差が大きくなったケースの最大潮 位偏差の分布を示す。最大潮位偏差が最も大きくなる直線経 路の詳細は、図-7中に示している通りである。また、当該 直線経路に最も近い既往台風経路による潮位偏差の分布も合 せて示す。これらの結果から、既往台風経路では、当該沿岸 部に接近するまで経路は異なるものの、沿岸域の潮位偏差の 分布は同様な傾向を示している。これらのことから、沿岸にお ける潮位偏差は、接近するまでの経路はほとんど影響がなく、 沿岸に進入する角度と台風の中心位置が重要になると考えら れる。ただしすべての経路に対して検討した場合この限りとな らない場合があるため今後精査が必要である。

図-12に数値実験の応答曲面(図-5)を用いて台風 の条件(進入角度、平行移動量)より推定した最大潮位偏差 (η model)と、実地形で計算より得られた最大潮位偏差(η calc.)の比較したものを示す。赤丸は応答曲面モデルの推定 値と直線台風を、青丸は既往台風経路の最大潮位偏差との関 係を示している。宮崎県新富町では、モデル推定値よりも全 体的に過大に評価することが確認された。数値実験のモデル 地形と比べ実地形では、海岸線に起伏を持っているため、吹 き寄せによる水位上昇が起きやすいことが考えられる。しかし ながら、相関値は直線経路0.73、既往台風0.72を示しており、 数値実験の傾向と概ね一致していることがわかる。伊勢湾を 有する名古屋においては、一部の経路の潮位偏差でばらつき があるものの、数値実験の値と良好に一致することが確認され た。伊勢湾の形状はモデル地形2と異なり、湾口から湾奥ま でL字型になっている。モデル地形では、湾口に対して直角 (進入角度90度) に風が吹く経路が潮位偏差最大となる傾向 があった。実地形でもこの傾向は得られたが、これに加えて、 湾奥に対して直角に風が吹く経路(進入角度150度)も潮位 偏差が大きくなった。そのため、モデル地形の結果と比べて実 地形の潮位偏差のほうが大きくなっているケースも生じている。 相関値は直線経路で0.82、既往台風経路で0.56となってお り、一部の経路で若干劣っているものの良好な結果が得られ



図-10 宮崎県新富町において最大潮位偏差を発生させた台風経路における最大潮位偏差の分布 (左:直線経路、右:既往台風経路 T8110)



図-11 名古屋において最大潮位偏差を発生させた台風経路における最大潮位偏差の分布 (左:直線経路、右:既往台風経路 T6214)





図-12 モデル地形と実地形における最大潮位偏差の比較

た。これらの結果より、若干のばらつきはあるものの、数値実 験結果は実地形の計算においても概ね再現でき、台風の進入 角度と平行移動量によって潮位偏差を推定できることを示した。 また、実地形計算において高い潮位偏差を発生させる経路は、 モデル推定値でも高い潮位偏差を推定しており、高潮が最大 となる経路の抽出を簡易に推定することを示した。

# 4. 主要な結論

本検討では高潮計算モデルを用いて複数の経路、海岸形 状で数値実験し、その傾向が実地形へ適用可能か検討した。 その結果以下の知見が得られた。

- 各モデル地形の数値実験の感度分析より、海岸地形特 性、台風経路および潮位偏差の特性を明らかにし、最 大潮位偏差を発生させる台風経路(平行移動量、進 入角度)を明らかにした。
- 本研究で作成した応答局面(図-5)を用いることで、
   実地形における台風経路の選定においても、最大となる高潮の台風経路(角度、平行移動量)を選定し、
   最大潮位偏差値を推定できることを示した。

以上の本研究結果より、最大潮位偏差を発生させる台風経 路を汎用的かつ簡易的に評価する手法を構築し、その有用 性を示した。今後は、日本海のように陸から海に進む経路や、 湾の複雑な形状・水深の違いについても検討していく予定で ある。

# 参考文献

- 農林水産省、国土交通省:高潮浸水想定区域図作成の手引き Ver.1.00、H27.7、http://www.mlit.go.jp/commo<sup>-</sup> n/001097 541.pdf、参照2018-03-01
- 2) 澁谷 容子、中條 壮大、森 信人、金 洗列、間瀬 肇:気候変動 に伴う最大クラス台風経路と高潮偏差および再現期間の推定・伊

勢湾における検討・、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.71、 No 2、pp.I\_1513-I\_1518、2015

- 3) 澁谷 容子、中條 壮大、金 洙列、森 信人、間瀬 肇:第二室戸 台風にもとづく大阪湾の高潮と浸水範囲におよぼす気候変動の 感度評価、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol. 72、No 2、 pp.I\_217-I\_222、2016
- 竹下 哲也、姫野 一樹、伍井 稔、冨永 侑歩、加藤 憲一、諏訪 義雄:想定台風・想定低気圧の経路の違いによる高潮計算の 感度分析、土木学会論文集 B2(海岸工学)、 Vol.72、No 2、 pp.I\_229·I\_234、2016
- 5) 宇都宮 好博、宮田 正史、高山 知司、河合 弘泰、平山 克也、
   鈴木 善光、君塚 政文、福永 勇介:シナリオ台風に基づく最大
   クラス高潮の設定法について、土木学会論文集 B2(海岸工学)、
   Vol. 73、No 2、pp.I\_247-I\_252、2017
- 本多 忠夫、光易 恒:水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究、海岸工学論文集、第27巻、pp.90-93、1980
- 河合 弘泰、富田 孝史:台風による内湾の高潮のリアルタイム予 測に関する基礎的検討、港湾空港技術研究所資料、No.1085、 2004
- 8) 内閣府中央防災会議:南海トラフの巨大地震モデル検討会、参照2018-03-01
- 9) 一般財団法人 気象業務支援センター:過去の気象データについて(台風経路データ)、参照2018-03-01
- 10) 国土交通省 気象庁:台風経路図、 http://www.data.jma.go.jp/、 参照2018-03-01