

# 数値シミュレーションを用いた 高潮予測式の係数評価

朝位孝二 (社会建設工学専攻) 矢野裕騎 (中外テクノス (株))

三浦房紀 (環境共生系専攻)

## Study on Estimation of Coefficients of Prediction Equation for Typhoon Tide using Numerical Simulation

Koji ASAI (Division of Civil and Environmental Engineering)

Yuki YANO (Chugai Technos Corporation)

Fusanori MIURA (Division of Environmental Science and Engineering)

Seto Inland Sea side of Yamaguchi Prefecture is suffering from typhoon tide. To prevent or reduce human damages caused by typhoon tide, to make an evacuation behavior is important action. To make an evacuation behavior effectively the typhoon tidal level should be predicted previously. In other words, the typhoon tidal level prediction system is necessary to support the evacuation behavior. Miura presented the typhoon tidal level prediction system, and in this system the prediction equation for typhoon tidal level is used. This equation is algebraic and includes two parameters. In this study, the coefficients of this equation are estimated by utilizing the numerical tidal simulation in order to enhance the Miura's system.

**Key Words :** *typhoon tide, coefficients of prediction equation for typhoon tide, numerical simulations*

### 1. はじめに

山口県の瀬戸内海側は高潮発生常襲地域である。過去には1999年の台風9918号や2004年の台風0416号などにより、県内の2万世帯の住宅が海水に浸かるなどの大規模な高潮被害を受けている。高潮災害から人命を守るためにハード面での対策は重要であるが、ハード的対策も万全ではなく、ソフト的対策である迅速な避難行動も必要である。そこで、事前の水位上昇の予測と避難勧告などの情報提供が必要となるが、行政にとって避難勧告などの発表の判断は容易でないため、避難勧告・指示の判断を支援するシステムが必要となる。

2003年に三浦らは高潮予測の支援システムの構築を行っている<sup>1),2),3),4)</sup>。彼らは、気象庁から発表される台風データをインターネットを通して読み込み、高潮予測式を用いて県内の主要箇所での高潮を予測するシステムを構築した。しかしながら高潮予測式に含まれる係数は観測地で異なり、気象庁によって

山口県内で決定された係数は下関市の弟子待のみである<sup>5)</sup>。つまり山口県内では下関市でしか高潮予測ができない。これを受けて、三浦らは新たに小野田、宇部、三田尻、徳山、安下庄、岩国において係数を決定した。係数の決定には、台風により観測された気圧、風速、風向、潮位偏差のデータが必要となるが、しかしながらこれらが同時にそろっている地点は少ない。そのため、三浦らは提唱している地点以外の場所のデータを用いて欠測データを補填している。

そこで、本研究では三浦らのシステムに補強を図るべく、数値シミュレーションを行うことにより各地点での気象データを数値的に求め、それらの値を用いて各地点の係数の再決定を試みた。また、数値シミュレーションであれば任意の場所のデータが得られるので、観測データが無い新しい場所の係数を決定することも可能である。よって上述の7カ所および新たに下松、光、柳井においても係数を決定した。

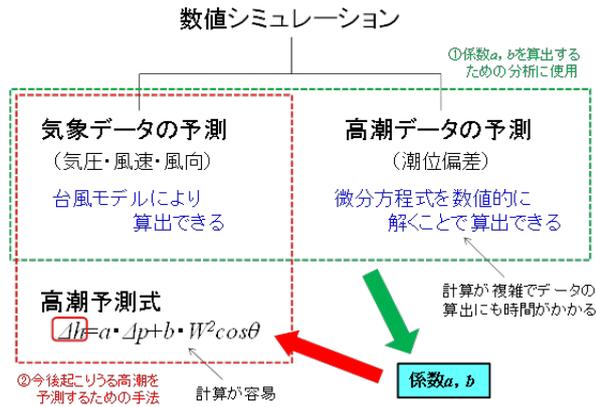


Fig.1 Schematic flow to determine coefficients of tidal height prediction equation

本研究では簡易的に高潮予測が行うためのツールとして高潮予測式の係数を提案することで、防災としての1つの目安として利用してもらうことを目的としている。

## 2. 高潮潮位偏差予測式

高潮の現象は、台風や低気圧の気圧降下による水面の吸い上げ作用や強風による吹き寄せ作用によって海面が上昇し、これが長波となって伝播されるとともに、台風の移動効果によっていっそう増大されて生じるものである。吸い上げ作用とは、台風の接近による気圧低下で海面が上昇する現象である。この現象は水深に関係なく様に生じ、気圧が1hPa減少すると海面は1cm上昇する。吹き寄せ作用とは、強風によって海面に生じるせん断力で海面が風の吹く方向に上り傾斜することによって起こる海面上昇である。海面の傾斜は水深が浅くなるほど急になるために、水深の浅い海域が広大なほど、吹き寄せによる海面上昇は増大する。このような気象による作用が重なって生じる海面の潮位を気象潮という。

高潮が気圧低下による吸い上げ効果と強風による吹き寄せ効果の和であると考えられるため、気象庁では、一般に次式で最大高潮偏差が表されるとした。

$$\Delta h = a \cdot \Delta p + b \cdot W^2 \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 $\Delta h$  は最大潮位偏差(=実測潮位-天文潮位)(cm)、 $\Delta p = (1010 - p)$ で  $p$  は最低気圧(hPa)、 $W$  は最大風速(m/s)、 $\theta$  は主方向と風向きとのなす角(degree)である。 $a$ 、 $b$  は各湾で決められた係数であるため、各地点により異なる。

この式は、台風通過時の観測地点における最低気圧、最大風速(とその時の風向)を代入することで、

簡易的に最大潮位偏差だけを求めるという式である。そのため、それぞれ発生時刻は一致していなくても良い。しかしながら三浦ら<sup>1)</sup>および本研究では、台風襲来時の同時刻ごとの気圧、風速、風向を用いてこの式に代入することで、各時間における潮位偏差を時系列で算出するように使用した。

高潮シミュレーションを行うことができるのであれば、高潮予測式は不要に思われるが、高潮シミュレーションを行うには水理学や数値計算の知識が必要であり、また数値解を得るには多くの計算時間が必要とされる。式(1)であれば代数式であるため直ちに潮位偏差を求めることができ、非常に簡便である。さて、その式に代入する気圧や風速、風向であるが、これは台風モデルで求めることができる。後述のようにこの式も代数的な式であるため直ちに気圧、風向、風速を求めることができる (Fig.1 の②の部分)。

## 3. 高潮数値シミュレーション

### (1) 高潮 (潮位偏差) 予測の基礎式

高潮は平面2次元的な現象として取り扱ってよい。そこで3次元の非圧縮性流体の連続式と運動方程式を水深積分して得られる浅水方程式が用いられる。それら基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial uU}{\partial x} + \frac{\partial vU}{\partial y} = & \\ -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2v_t \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_t \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] & \\ - \frac{\gamma^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{(h+\eta)^2} - fU + C_d W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} & \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial uV}{\partial x} + \frac{\partial vV}{\partial y} = & \\ -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2v_t \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ v_t \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] & \\ - \frac{\gamma^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{(h+\eta)^2} - fV + C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} & \end{aligned} \quad (4)$$

式(2)は連続の式、式(3)はx方向の運動方程式、式(4)はy方向の運動方程式である。ここで、 $\eta$  は潮位、 $U$ 、 $V$  はx、y方向の線流量、 $u$ 、 $v$  はx、y方向の水深平

均流速,  $g$  は重力加速度,  $h$  は平均水深,  $\nu_t$  は渦動粘性係数,  $\gamma^2$  は海底摩擦係数,  $C_d$  は海面抵抗係数,  $W_x$  は  $x$  方向の流速,  $W_y$  は  $y$  方向の流速である. これを連続の式と水面勾配項を連立させ, それ以外の項は陽的に解く半陰解法を採用した. また離散化手法には有限体積法を用いた.

## (2) 台風モデル

台風モデルは種々提案されているがここでは以下に示す Mayer のモデルを採用する.

$$P = P_c + (1010 - P_c) \exp(-r_m / r) \quad (5)$$

ここで  $P$  は算出地点の海面気圧(hPa),  $P_c$  は中心気圧(hPa),  $r_m$  は最大風速半径(km),  $r$  は台風中心位置から算出地点までの距離(km)である.

今回の研究では, 台風が九州に上陸してから山口県を抜けるまでの 47 時間(1 時間毎)の中心位置, 中心気圧のデータを気象庁から入手して計算を行った. そのため, この台風データより, 台風中心位置からの各算出地点(下関, 小野田, 宇部, 三田尻, 徳山, 下松, 光, 柳井, 安下庄, 岩国)までの距離  $r$  を求め, その地点の中心気圧, 台風半径を時間毎に式に代入することで算出地点の気圧場を時系列で出力できる.

一般に台風モデルは傾度風といわれるコリオリ力と水平気圧傾度力, 遠心力のつりあいによって生み出される風(傾度風)をモデルとして扱う. 台風とともに移動する座標系では傾度風は次式で与えられる.

$$\frac{V_{gr}^2}{r} + fV_{gr} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (6)$$

$V_{gr}$  は傾度風である.  $f$  はコリオリのパラメータで  $f=0.00008025$ ,  $\rho_a$  は空気の密度で  $\rho_a=1.30\text{kg/m}^3$  を用いる. 圧力  $P$  を各地での既知の関数として傾度風  $V_{gr}(\text{m/s})$  が式(7)によって求められる.

$$V_{gr} = -\frac{fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{fr}{2}\right)^2 + (1010 - P_c) \frac{r_m}{r} \exp\left(-\frac{r_m}{r}\right)} \quad (7)$$

$V_{gr}$  を偏角分だけ内側に傾けたものが  $V_s(\text{m/s})$  であり, 式(8)によって求められる. 定数  $C_2$  は風速・風向場の特性を決定づけるパラメータであり, ここでは  $C_2=0.4$  とした.

$$V_s = C_2 V_{gr} \quad (8)$$

また, 台風の移動に伴う風  $V_p$  は式(9)によって求められる.

$$V_p = C_1 V_t \exp(-\beta r) \quad (9)$$

$V_t$  は台風の移動速度であり,  $C_1=4/7$ ,  $\beta=\pi/400000$  を用いた. 風速  $W(\text{m/s})$  は,  $V_p$  と傾度風  $V_s$  とのベクトル和によって決定される.

傾度風は台風の進行方向と垂直に吹くが, 一般に地表面もしくは水表面との摩擦抵抗があるため, 台風を中心に向かって  $30^\circ$  だけ偏向することが過去の多くの研究によって定義されているため, ここでは  $30^\circ$  を用いることにする. 風向は, 台風モデルによって算出された風速から求めることができ, 北を  $0^\circ$ , 東を  $90^\circ$ , 南を  $180^\circ$ , 西を  $270^\circ$  で示すような角度  $\theta$  を計算する.

## (3) 最大風速半径

式(7)にはパラメータとして最大風速半径  $r_m$  が必要となる. これは気象庁が発表する強風半径や暴風半径とは異なる. そこで, 本研究では以下のようにしてこれを与えることにした. まず式(5)を以下のように変形する.

$$r_m = -r \ln \left\{ (P - P_c) / (1010 - P_c) \right\} \quad (10)$$

上式より,  $r_m$  を算出する地点として新門司, 下関, 宇部, 呉, 大分において  $r_m$  をそれぞれ算出し, この 5 箇所の地点における  $r_m$  の平均値を求め, その平均値を台風モデルに用いることにした. ここで, この 5 箇所の  $r_m$  の平均値として求めた  $r_m$  を逆算  $r_m$  と呼ぶこととする. しかし, この逆算  $r_m$  は過去の台風データをもとに追算で求めたものであり, 予測の面では実用性に欠ける. そこで, 最大風速半径には  $60\text{km}$  を用いられることが多いので,  $r_m$  を  $60\text{km}$  に固定して台風モデルに適用した. 以後, これを  $r_{m60}$  と呼ぶことにする. したがって, 本研究では台風モデルに用いる最大風速半径については, 逆算  $r_m$  および  $r_{m60}$  の 2 パターンで検証を行った.

## (4) 計算条件と計算領域

計算領域は, 東経  $130^\circ 58' \sim 132^\circ 43'$ , 北緯  $33^\circ 14' \sim 34^\circ 14'$  の間を  $1\text{km}$  メッシュのスタaggered 格子を考え, 139 行, 143 列の計算領域を海上保安庁水路部の作成した日本海  $1000\text{km}$  メッシュデジタル海底地形データを用いて作成した. 計算領域を Fig.2 に示す. 計算時間は, 台風が九州に接近してから山口県を抜けるまでの 47 時間とし, 計算時間間隔は  $60$  秒とした. 潮位偏差を求めるので境界条件として, 旧門司 ~ 壇ノ浦および小用 ~ 松山, 下浦 ~ 宇和島には吸い上げの値だけを与え, 天文潮位は与えていない.

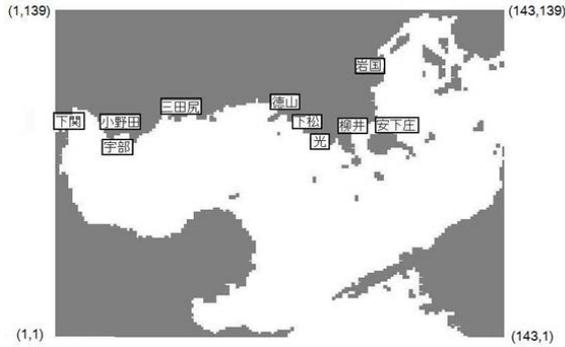


Fig.2 Computational domain

Table1 List of available data

台風9918号										
	下関	小野田	宇部	三田尻	徳山	下松	光	柳井	安下庄	岩国
気圧	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×
風速	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×
風向	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×
潮位偏差	×	△	○	○	○	×	×	×	×	○

台風0416号										
	下関	小野田	宇部	三田尻	徳山	下松	光	柳井	安下庄	岩国
気圧	○	×	○	×	×	×	×	×	×	○
風速	○	×	○	○	×	×	×	○	○	○
風向	○	×	○	○	×	×	×	○	○	○
潮位偏差	○	×	○	○	○	×	×	×	×	○

台風0418号										
	下関	小野田	宇部	三田尻	徳山	下松	光	柳井	安下庄	岩国
気圧	○	×	○	×	×	×	×	×	×	○
風速	○	×	○	○	×	×	×	○	○	○
風向	○	×	○	○	×	×	×	○	○	○
潮位偏差	○	×	○	○	○	×	×	×	×	○

#### 4. 数値シミュレーションの検証

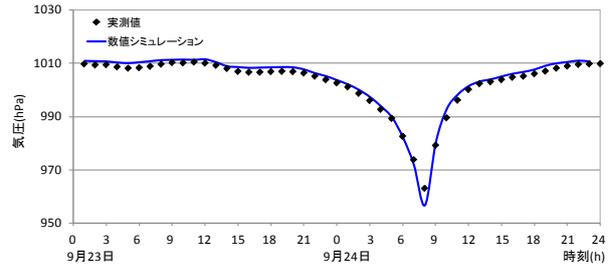
##### (1) 台風モデルの検証

高潮は気圧低下と風によって発生するため、台風モデルで評価する気圧、風速、風向の精度が重要となる。そこで台風モデルの精度について検証を行った。Table 1 は気象庁から入手した気象データ(気圧、風速、風向) および潮位データの一覧表である。表中の○, ×, △はそれぞれデータがある場合、ない場合、欠測により不備がある場合を表している。この表より、下関においては3つすべての台風において実測データがあるので、下関において台風モデルの適合性の検証を行うことにした。

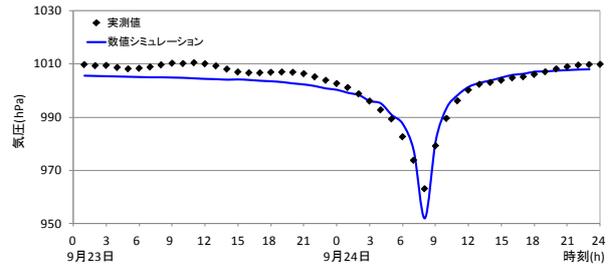
まず台風 9918 号のデータを用いて台風モデルの検証を行う。Fig.3(a)は逆算  $r_m$  を用いて得られた気圧変化, Fig.3(b)は  $r_{m60}$  を用いて得られた気圧変化である。逆算  $r_m$  の場合, 気圧の再現が非常に良好である。 $r_{m60}$  を用いた場合も比較的良く気圧変化を再現している。

Fig.4(a)は逆算  $r_m$  を用いて得られた風速の時系列, Fig.4(b)は  $r_{m60}$  を用いて得られた風速の時系列である。気圧が最低となる時刻で風速の変化が両者で若干異なるが、概ね両者は一致している。また実測値も多少の誤差があるが、概ね良好に一致していると言える。

Fig.5 は風向の時系列を示したものである。風向は

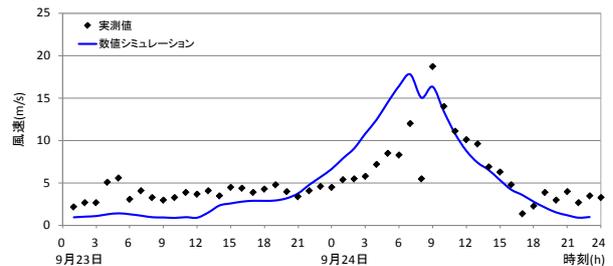


(a)  $r_m$  estimated by back calculation

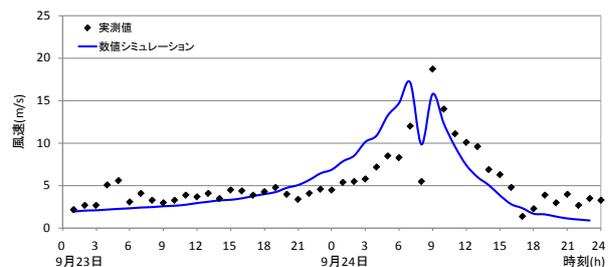


(b)  $r_{m60}$

Fig.3 Verification of pressure (Typhoon9918)



(a)  $r_m$  estimated by back calculation



(b)  $r_{m60}$

Fig.4 Verification of wind speed (Typhoon9918)

最大風速半径には依存しない。風向においても良好に実測値を一致している。

次に台風 0416 号のデータを用いて検証を行う。Fig.6 は気圧変化を示したものである。Fig.3 と同様逆算  $r_m$  を用いた結果は非常に良好である。 $r_{m60}$  を用いた場合には全体的に、気圧が高めに評価されているが最低気圧は一致している。最大潮位偏差を対象とするので最低気圧が一致の一致は大変重要である。

Fig.7 は風速の時系列を示したものである。Fig.4

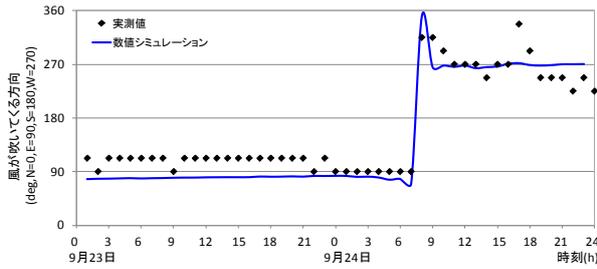
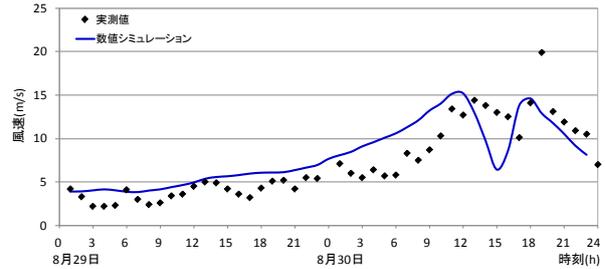
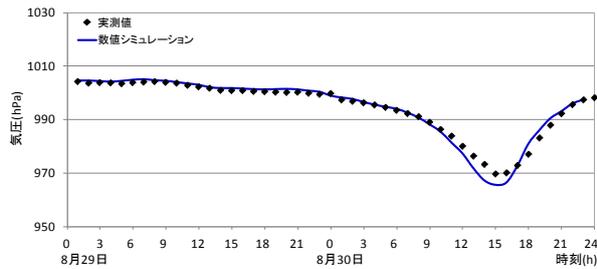


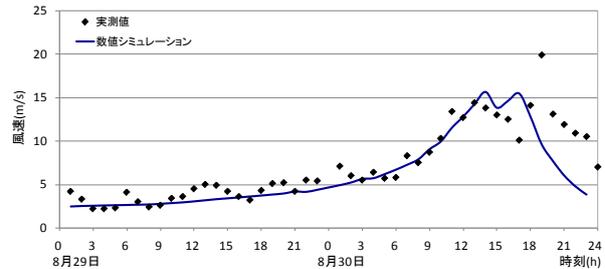
Fig.5 Verification of wind angle (Typhoon9918)



(a)  $r_m$  estimated by back calculation

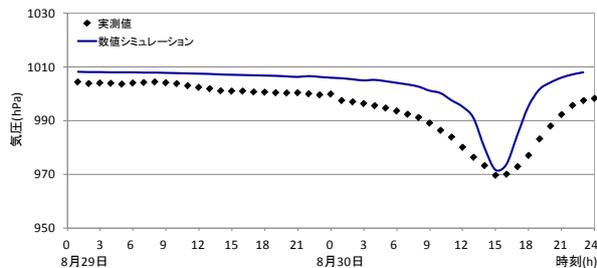


(a)  $r_m$  estimated by back calculation



(b)  $r_m60$

Fig.7 Verification of wind speed (Typhoon0416)



(b)  $r_m60$

Fig.6 Verification of pressure (Typhoon0416)

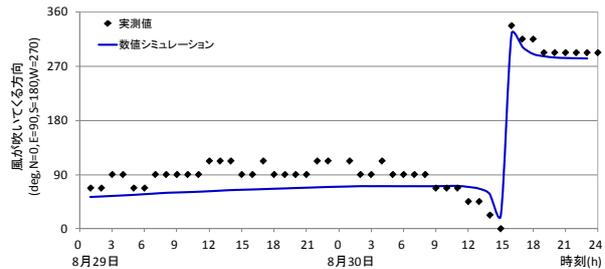


Fig.8 Verification of wind angle (Typhoon0416)

と同様、最低気圧の時刻で(a)と(b)に違いが見られるが、両者とも概ね実測値と一致している。

Fig.8 は風向を示している。風向についても Fig.5 と同様、実測値と良く一致している。

台風 0418 においても同様の結果が得られている。よって台風モデルは逆算  $r_m$ 、 $r_m60$  どちらを使用しても大きな相違はなく、実測値を良好に再現できることが分かった。

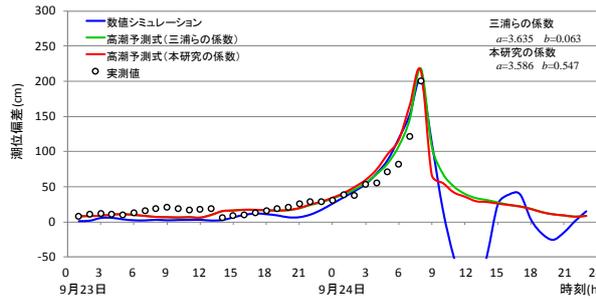
### (2) 高潮シミュレーションの検証

数値シミュレーションにおいて、実測の潮位偏差に近い値を予測する方法として、抵抗係数  $C_d$  を調整するという方法がある。抵抗係数とは、海面と風との抵抗力を決定づける係数のことで、この数値が大きくなると潮位偏差は高くなる。ある地点の実測の潮位偏差と適合するように海面の抵抗係数  $C_d$  を調整したが、それにより別の地点での適合性が悪くなる場合があった。そこで、算出地点ごとに  $C_d$  を調整して潮位偏差の適合性を検証し、各地点での最適な

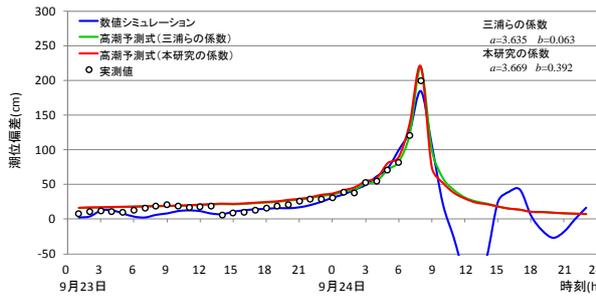
$C_d$  を試算的に決定した。これにより得られた気圧、風速、風向、潮位偏差のデータを用いて高潮予測式に代入することで、各地点における最適な係数  $a$ 、 $b$  を求めた。また、全計算領域で  $C_d$  を変化させることで潮位偏差を増加させた。なお、海面抵抗係数の標準値を  $C_d=0.0026$  とし、その整数倍で調整を行った。

気象庁から入手した潮位偏差のデータに関しては、宇部、三田尻、徳山、岩国においてデータがあるため、これらの 4 地点において検証を行った。高潮の数値シミュレーションには台風 9918 号、0416 号、0418 号においてそれぞれ逆算  $r_m$  と  $r_m60$  の台風モデルを作成し、計 6 パターンで行った。

Fig.9, Fig.10 および Fig.11 はそれぞれ宇部、三田尻、岩国における潮位偏差の検証結果であり、台風が九州に接近してから山口県を抜けるまでの 47 時間における潮位偏差を示した。潮位偏差の比較は、実測値および数値シミュレーションの値、三浦らの係数を用いて高潮予測式に代入して算出した値、本研究の係数を用いて高潮予測式に代入して算出した

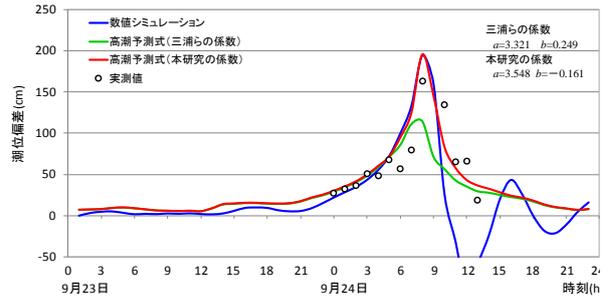


(a)  $r_m$  estimated by back calculation

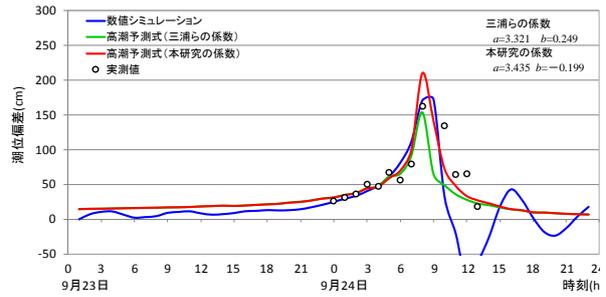


(b)  $r_m60$

Fig.9 Verification of tidal height (Ube)



(a)  $r_m$  estimated by back calculation



(b)  $r_m60$

Fig.10 Verification of tidal height (Mitajiri)

値の4つで行い、それぞれ適合性の検証を行った。

Fig.9(a)は宇部において台風 9918 号を対象に換算  $r_m$ による台風モデルを用いた結果であり、(b)は  $r_m60$ による台風モデルを用いた結果である。  $C_d$ は標準値の3倍の場合を示している。いずれも潮位偏差が上昇していく立ち上がりの時間帯においては、実測値に対してすべての予測潮位偏差の値で良い適合性があるといえる。最大潮位偏差となる24日の8時においては、換算  $r_m$ を用いた結果は潮位偏差を良好に再現しているが、 $r_m60$ を用いた場合の予測値は実測値よりも15cm程低く出てしまった。  $C_d$ を標準値の2倍および4倍にするとピーク値の再現性が悪くなることが分かった。したがって、宇部ではいずれも  $C_d$ を通常の3倍にした場合が最適とした。

Fig.10(a)は三田尻において台風 9918 号を対象に換算  $r_m$ による台風モデルを用いた結果であり、(b)は  $r_m60$ による台風モデルを用いた結果である。いずれも  $C_d$ が標準値の3倍の場合の結果を示している。いずれの図も潮位偏差の立ち上がりにおいては予測潮位で高い適合性がみられた。しかし、最大潮位偏差では換算  $r_m$ による結果は実測よりも若干過大評価となった。 $r_m60$ による最大潮位偏差の結果はピーク時刻が少しずれて若干の過大評価となった。若干の不一致がみられるが両者とも概ね、潮位偏差を再現していると思われる。

他の台風の場合の結果は紙面の都合上、ここでは示していないが概ね台風 9918 号の場合と同様の結果が得られている。換算  $r_m$ による台風モデルを用いた

Table2 List of computational cases

	逆算 $r_m$	$r_m60$
9918号	case1	case4
0416号	case2	case5
0418号	case3	case6
平均	case7	case8
平均	case9	

場合も、 $r_m60$ による台風モデルを用いた場合も概ね高潮現象は再現できている。

### 5. 高潮潮位偏差予測式の係数

#### (1)各ケースにおける高潮予測式の係数

高潮超偏差予測式の係数は、潮位偏差を目的関数とし、気圧および風速を説明変数にして重回帰分析によって決定したり。今回は3個の台風および逆算  $r_m$ と  $r_m60$ の二通りを用いてシミュレーションを行っているため合計6パターンで各地点の係数を決定している。Table2に示すように、各パターンをそれぞれcase1~6とした。さらにcase1, 2, 3で得られた係数の平均値をcase7, case4, 5, 6で得られた係数の平均値をcase8, case1~6の平均値をcase9とした。

Table2にケース毎の各地点の係数の一覧表である。この10ケースの係数において、3つの台風でそれぞれの程度の適合性があるのか、その相関について検証した。検証方法として、3つの台風モデルにお

Table3 List of coefficients obtained for each case

	case1		case2		case3		case4		case5	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
下関	0.990	0.000	-1.027	0.605	0.989	-0.001	0.991	0.000	0.986	0.001
小野田	3.421	0.623	4.362	-0.71	2.437	-0.35	3.563	0.511	8.738	-1.862
宇部	3.586	0.547	4.198	-0.85	0.604	-0.769	3.669	0.392	5.623	-1.066
三田尻	3.548	-0.161	4.474	-0.44	0.399	-0.632	3.435	-0.199	4.196	-2.576
徳山	0.761	-0.666	1.646	-1.365	-0.029	-0.589	0.114	-0.696	0.755	-0.89
下松	1.202	-0.44	1.802	-0.784	-0.51	-0.493	1.21	-0.382	0.398	-0.612
光	0.872	-0.453	1.686	-0.634	-0.718	-0.492	0.955	-0.382	0.178	-0.575
柳井	1.715	-0.172	2.142	-0.304	0.973	-0.185	2.286	-0.096	0.844	-0.306
安下庄	1.427	-0.078	1.35	-0.195	0.678	-0.109	1.832	-0.033	0.605	-0.181
岩国	4.072	-0.287	0.343	-1.121	0.402	-0.465	4.437	-0.216	-0.92	-0.936
	cas6		case7		case8		case9		三浦ら <sup>1)</sup>	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
下関	0.989	-0.001	0.317	0.201	0.989	0.000	0.653	0.101	1.231	0.033
小野田	2.437	-0.35	3.407	-0.146	4.913	-0.567	4.160	-0.356	4.303	0.047
宇部	2.080	-0.352	2.796	-0.357	3.791	-0.342	3.293	-0.350	3.635	0.063
三田尻	1.613	-0.551	2.807	-0.411	3.081	-1.109	2.944	-0.760	3.321	0.249
徳山	-1.316	-0.719	0.793	-0.873	-0.149	-0.768	0.322	-0.821	3.671	0.016
下松	-0.51	-0.493	0.831	-0.572	0.366	-0.496	0.599	-0.534		
光	-0.718	-0.492	0.613	-0.526	0.138	-0.483	0.376	-0.505		
柳井	0.973	-0.185	1.610	-0.220	1.368	-0.196	1.489	-0.208		
安下庄	0.678	-0.109	1.152	-0.127	1.038	-0.108	1.095	-0.118	2.556	0.106
岩国	2.384	-0.355	1.606	-0.624	1.967	-0.502	1.786	-0.563	2.876	0.291

いてそれぞれこの 10 ケースの係数を用いた高潮予測式による予測潮位偏差を計算し、その結果において各地点で実測値との相関性を検証した。この時、台風モデルに用いる台風半径  $r_m$  には、高潮予測の実用性を考え、予測の観点に基づいた  $r_m$  60 を用いて検討を行った。

Fig.11 は台風 0416 号を対象とした宇部における高潮予測式の結果である。Fig.11(a)より、潮位偏差の立ち上がりと最大潮位偏差において、case1, 4, 5 の係数による予測潮位の値が実測値に対して良い適合性がみられた。

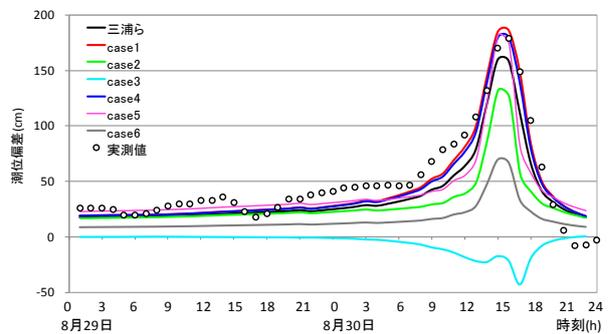
Fig.11(b)は、case7~case9 の係数において高潮予測式から算出した潮位偏差と、実測値との適合性を検証した結果である。この図では、最大潮位偏差において case7, 8, 9 すべてで実測値よりも低い値となっており、あまり良い適合性はみられなかった。

Fig.12 は、縦軸に実測値、横軸に case1~case6 および三浦らの係数における予測潮位の値をとって表した相関図である。この図には、各ケースにおいてプロットされた値から原点を通過する近似直線を描き、その時の数式および相関係数  $R^2$  についてそれぞれ示している。このとき、近似直線は  $y=x$  に近いほど相関性が高いと判断できる。よって Fig.11 と同様に、近似直線からも case1, 4, 5 の係数の相関性が高いと判断できる。

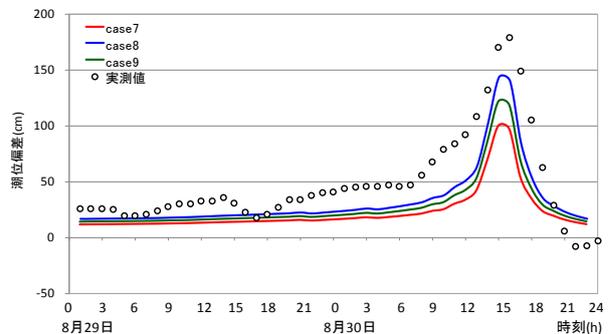
このようにケース毎に得られた係数は他のケースに適応が困難な場合があることが分かる、

(2) 高潮予測式の係数の提案

地点毎に一般性の高い係数を求めることを行った。Fig.12 に示すような相関図から直接妥当性を判断することは、主観を含んでしまうため客観性に欠ける。そこで、係数の評価について明確で普遍的な判断をするために、相関係数  $R^2$  などの値から数値ごとに区



(a)case1~6



(b)case7~9

Fig.11 Verification of tidal height (Ube)

別して○や×などの記号を用いて相関性を評価することにした。

評価方法として、まず一つ目は近似曲線の傾き  $c$  と相関係数  $R^2$  の値から相関性を評価する。この判断基準は、 $0.7 \leq c < 1.3$  かつ  $0.6 \leq R^2 \leq 1$  のときは○とし、 $0.5 \leq c \leq 0.7$ 、 $1.3 \leq c < 1.6$  または  $0.3 \leq R^2 \leq 0.6$  のときは△とし、 $0.5 \geq c$ 、 $1.6 \leq c$  のときは×、 $0 \leq R^2 \leq 0.3$ 、 $1 \leq R^2$  のときは×とした。

さらに、もう一つの判定の尺度として潮位偏差のデータより全ケースの予測潮位の最大値と実測値の最大値において相対誤差を式(10)のように算出することで、相関性を検証した。ここで、相対誤差  $r$  の

Table 4 Estimation of coefficients (Ube)

(a) Collation between observed and predicted values

近似直線の傾きと相関係数 $R^2$ による評価											
宇部	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	
9918号	傾き	0.92	0.88	0.87	3.46	0.88	0.64	1.73	1.27	0.92	1.07
	$R^2$	0.980	0.982	0.934	0.302	0.983	0.939	0.946	0.957	0.966	0.962
	評価	○	○	○	×	○	△	×	○	○	○
0416号	傾き	1.24	1.04	1.58	-5.48	1.08	1.15	2.99	2.06	1.42	1.68
	$R^2$	0.904	0.913	0.794	0.417	0.912	0.808	0.827	0.856	0.875	0.868
	評価	○	○	△	×	○	○	×	△	△	×
0418号	傾き	1.33	2.03	0.57	1.00	1.84	0.44	1.25	1.05	0.87	0.95
	$R^2$	0.779	0.538	0.481	0.121	0.780	0.495	0.517	0.566	0.617	0.595
	評価	△	×	△	×	×	×	○	△	○	△

(b) Relative error of maximum tidal height

最大潮位偏差の相対誤差 $r$ による評価											
宇部	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	
9918号	$r$	9.05	7.58	25.94	-60.22	10.07	68.69	-37.6	-16.12	13.73	-1.21
	評価	○	○	○	×	○	×	×	×	○	×
0416号	$r$	-10.74	3.96	-25.86	-99.54	0.61	1.58	-61.1	-44.06	-19.7	-31.91
	評価	×	○	×	×	○	○	×	×	×	×
0418号	$r$	-6.08	-70.11	162.21	45.47	-59.92	239.12	18.39	39.8	65.88	52.9
	評価	×	×	×	△	×	×	○	△	×	△

Table 5 Estimation of coefficients (Mitajiri)

(a) Collation between observed and predicted values

近似直線の傾きと相関係数 $R^2$ による評価											
三田尻	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	
9918号	傾き	1.12	0.91	0.68	2.26	0.93	0.41	1.41	1.02	0.72	0.85
	$R^2$	0.551	0.625	0.625	0.058	0.626	0.384	0.527	0.614	0.517	0.569
	評価	△	△	△	×	○	×	△	○	△	△
0416号	傾き	1.46	1.41	1.13	3.57	1.46	1.11	3.15	1.81	1.64	1.73
	$R^2$	0.889	0.825	0.784	1.977	0.816	0.072	0.480	0.739	0.449	0.606
	評価	△	△	○	×	△	×	×	×	×	×
0418号	傾き	2.26	1.25	0.81	1.25	1.23	0.28	1.15	1.09	0.58	0.76
	$R^2$	0.775	0.688	0.594	0.043	0.665	0.192	0.324	0.520	0.311	0.391
	評価	×	○	△	×	○	×	△	△	△	△

(b) Relative error of maximum tidal height

最大潮位偏差の相対誤差 $r$ による評価											
三田尻	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	
9918号	$r$	-5.91	29.88	80.07	-29.37	28.71	237.9	-8.1	22.26	79.44	50.85
	評価	×	○	×	×	○	×	×	○	×	△
0416号	$r$	-20.93	-15.52	6.52	-85.4	-18.21	9.81	-61.6	-33.16	-26.64	-29.9
	評価	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×
0418号	$r$	-67.36	-2.53	57.87	1.52	0.73	367.19	14.8	18.96	127.62	73.29
	評価	×	×	△	○	○	×	○	○	×	×

値をプラスかマイナスで算出するために、分子は絶対値をとらずに予測潮位から実測値を引くようにした。これによりプラスの場合は予測潮位の方が高い場合なので、防災の観点からはプラスの方が良いと判断できる。

$$\text{相対誤差}r = \frac{\text{予測潮位} - \text{実測値}}{\text{実測値}} \quad (10)$$

相対誤差における評価基準は、 $0\% \leq r < 35\%$ のときは○とし、 $35\% \leq r < 60\%$ のときは△とし、 $r \leq 0\%$ 、 $60\% \leq r$ のときは×とした。この評価基準に従って、宇部、三田尻、徳山、岩国の4地点においてそれぞれ3つの台風による検証結果より相関性の評価を行った。

この評価基準に従って、宇部、三田尻、徳山、岩国の4地点において、それぞれ3つの台風による検証結果より係数の評価を行った。その評価についてまとめたものをTable 4~7に示す。それぞれ宇部、三田尻、徳山、岩国における評価結果である。

Table 8はTable 4~7の○、△、×の数をまとめたも

Table 6 Estimation of coefficients (Tokuyama)

(a) Collation between observed and predicted values

近似直線の傾きと相関係数 $R^2$ による評価											
徳山	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	
9918号	傾き	1.02	0.98	0.47	1.29	1.07	0.76	1.18	0.77	1.01	0.89
	$R^2$	0.807	0.705	0.713	0.498	0.547	0.667	0.239	0.675	0.462	0.592
	評価	○	○	△	△	△	○	×	○	△	△
0416号	傾き	1.09	1.46	0.70	1.86	1.57	1.14	-0.11	1.15	1.42	1.31
	$R^2$	0.923	0.279	0.297	0.244	0.120	0.184	1.296	0.205	0.337	0.004
	評価	○	×	×	×	×	×	×	×	△	×
0418号	傾き	0.91	0.72	0.35	0.93	0.77	0.56	0.87	0.57	0.72	0.64
	$R^2$	0.583	0.551	0.553	0.494	0.506	0.540	0.315	0.542	0.484	0.519
	評価	△	△	×	△	△	△	△	△	△	△

(a)  $r_m$  estimated by back calculation

最大潮位偏差の相対誤差 $r$ による評価											
徳山	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	
9918号	$r$	-8.04	10.35	128.38	-16.75	1.14	40.75	-22.29	39.41	6.48	22.82
	評価	×	○	×	×	○	△	×	△	○	○
0416号	$r$	3.12	-11.73	83.17	-40.3	-25.57	11.1	-60.82	10.35	-25.06	-7.3
	評価	○	×	×	×	×	○	×	○	×	×
0418号	$r$	-20.05	43.52	196.09	11.05	34.58	85.87	6.62	83.5	42.29	62.99
	評価	×	△	×	○	○	×	○	×	△	×

Table 7 Estimation of coefficients (Iwakuni)

(a) Collation between observed and predicted values

近似直線の傾きと相関係数 $R^2$ による評価											
岩国	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	
9918号	傾き	2.22	0.84	0.61	1.40	0.85	0.78	1.09	0.89	0.23	0.93
	$R^2$	0.255	0.123	0.576	0.464	0.156	0.942	0.004	0.233	0.201	0.178
	評価	×	×	△	△	×	×	×	×	×	×
0416号	傾き	1.93	0.86	0.76	1.75	0.84	0.86	1.19	1.06	-1.85	1.10
	$R^2$	0.682	0.675	0.126	0.031	0.704	0.662	0.568	0.322	0.616	0.383
	評価	×	○	×	×	○	×	△	△	×	△
0418号	傾き	1.88	0.68	0.45	1.03	0.69	0.56	0.85	0.67	0.40	0.71
	$R^2$	0.216	0.414	0.088	0.135	0.433	0.055	0.349	0.236	0.524	0.261
	評価	×	△	×	×	△	×	△	×	△	×

(b) Relative error of maximum tidal height

最大潮位偏差の相対誤差 $r$ による評価											
岩国	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	
9918号	$r$	-75.05	8.25	67.17	-26.39	4.02	19.76	-9.88	16.3	-59.98	10.47
	評価	×	○	×	×	○	×	×	×	×	○
0416号	$r$	-57.13	43.33	60.36	-26.81	43.1	2.93	9.19	25.59	-82.62	21.96
	評価	×	△	×	×	△	○	○	○	×	○
0418号	$r$	-81.39	33.89	114.4	-5.91	27.98	55.1	13.02	47.41	-46.04	39.68
	評価	×	○	×	×	○	△	○	△	×	△

のである。この図より、宇部と岩国では、case1とcase4において最も○が多く、良い適合性がみられた。三田尻においてはcase4に最も相関があった。また、徳山においては三浦らの係数において最も良い適合性がみられた。

したがって、宇部、三田尻、岩国においてはすべてcase4の係数に最も適合性が良かった。徳山においては三浦らの係数が最も適合性が良かった。よって、徳山は三浦らの係数に決定し、それ以外の9地点においてはcase4の係数に決定した。本研究で提案する高潮予測式の係数をTable 9に示す。

## 6. おわりに

今回の研究により、数値シミュレーションを用いることで三浦らのシステムに補強を図ることができた。また、これまで高潮予測の行うことのできなかつた地点において、簡単に高潮予測ができる一つのツールとして高潮予測式の係数を提案した。本研究は実測の観測データが少ないという状況下で数値シ

Table 8 Summarization of estimation of coefficients

宇部	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9
○	3	4	2	0	4	2	2	1	3	1
△	1	0	2	1	0	1	0	3	1	2
×	2	2	2	5	2	3	4	2	2	3
三田尻	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9
○	0	3	2	1	4	1	1	3	0	0
△	2	1	3	0	1	0	2	1	2	3
×	4	2	1	5	1	5	3	2	4	3
徳山	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9
○	3	2	0	1	2	2	1	2	1	1
△	1	2	1	2	2	2	1	2	4	2
×	2	2	5	3	2	2	4	2	1	3
岩国	三浦ら	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9
○	0	3	0	0	3	2	2	2	0	2
△	0	2	1	1	2	1	2	2	1	2
×	6	1	5	5	1	3	2	2	5	2

ミュレーションによりシステムの補強を図ったが、あくまで防災としての一つの目安として利用してもらうことを目的としている。よって、今後は本研究が提案するこの係数について、行政や地域の方達に実際に使ってもらうことでその有用性についても検証する必要がある。

#### 謝辞

本研究は山口大学工学部三浦房紀研究室における先駆的研究に基づいている。その研究に尽力頂いた土屋千恵美氏、岡本充央氏、伊藤浩太氏に深甚な謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 三浦房紀：山口県土木防災情報システムを活用した高潮予測システムの開発，平成15年度官学共同研究報告書，2003.
- 2) 土屋千恵美：有効な情報の伝達を考慮した高潮予測システムの開発，平成13年度山口大学大学院理工学研究科修士論文，2002.
- 3) 岡本充央：山口県における簡易高潮予測システムの開発，平成15年度山口大学大学院理工学研究科

Table 9 Final coefficients presented in this study

	<i>a</i>	<i>b</i>
下関	0.991	0.000
小野田	3.563	0.511
宇部	3.669	0.392
三田尻	3.435	-0.199
徳山	3.671	0.016
下松	1.21	-0.382
光	0.955	-0.382
柳井	2.286	-0.096
安下庄	1.832	-0.033
岩国	4.437	-0.216

修士論文，2004.

- 4) 伊藤浩太：高潮予測システムの開発に関する研究－山口県内主要港湾を対象として－，平成17年度山口大学大学院理工学研究科修士論文，2006.
- 5) 例えば，宮崎正衛：高潮の研究，p.91，成山堂書店，2003.

(平成26年1月31日受理)