

ニューラルネットワークと数値解析による高潮現象のハイブリッドリアルタイム予測

HYBRID REAL TIME PREDICTION OF STORM SURGES CAUSED BY TYPHOON WHICH USES NEURAL NETWORK METHOD AND NUMERICAL MODEL

天羽誠二¹・中野 晋²・木村剛士³・津川 茂⁴

Seiji AMOU・Susumu NAKANO・Takeshi KIMURA・Shigeru TSUGAWA

¹正会員 四国建設コンサルタント株式会社 技術部 (〒771-1156 徳島市応神町応神産業団地3-1)

²正会員 博(工) 徳島大学助教授 環境防災研究センター (〒770-8506 徳島市南常三島2-1)

³学生員 徳島大学大学院工学研究科 (〒770-8506 徳島市南常三島2-1)

⁴鳴門市企画総務部防災安全課 (〒772-8501 鳴門市撫養町南浜字東浜170)

The purpose of this research is a real-time forecasting of a storm surge caused by typhoon. The lead time of forecasting was set six hours in consideration of time that it was possible to take shelter. Various parameters of the typhoon model used in the storm surge analysis were presumed by the neural network technique (BP method). The typhoon data which had passed the surrounding of Shikoku between 1991 and 2004 was used for the study data in the BP method. The numerical analysis of the storm surge for the T0514 typhoon was executed based on the predicted parameters by the BP method and the practicality of this forecasting system was examined by the comparison between observed storm tide and calculated one.

Key Words : storm surge , real-time prediction , neural network method , numerical model

1. はじめに

台風来襲時期には日本各地で豪雨や高潮に伴う災害が発生し、甚大な被害を生じている。平成16年には過去最多の10個の台風が上陸し、各地に洪水氾濫被害をもたらした。その後の平成17年台風14号、あるいは平成18年台風10号等は記憶に新しい。この台風来襲時には高潮現象が生じるため、満潮時と重なる際には十分な警戒を必要とする。実際、平成16年台風16号では、瀬戸内海域や四国東部の沿岸部において高潮被害が発生し、特に香川県高松市では市内の主要箇所に越水・浸水被害をもたらした。¹⁾

このような高潮被害を未然に防止・軽減するために、数時間前に高潮現象を予測することができれば、防災対策上あるいは災害時の初動体制に大きく寄与するものと考えられる。実際、徳島県北部沿岸の高潮常襲地区での災害調査において、避難準備等で3時間前には高潮予測情報が必要との住民意見が多く聞かれた。

しかしながら、高潮現象の予測においては、台風進路や時々刻々の最大風速半径あるいは台風中心気圧の変化等、事前予測の難しい事象があり、また、予測計算に要する演算時間の短縮化等、解決すべき課題も多い。²⁾⁻³⁾

この高潮現象を規定する諸条件の予測方法としては、例えば多変量解析、カルマンフィルター、モンテカルロ法

等が挙げられるが、諸定数は空間規模の同時刻の気象現象によって規定され、相互に関連しており、かつ非線形的現象である。このため、台風来襲時の広域気象情報に基づくとともに、過去に来襲した台風特性も反映することができ、短時間で、しかも簡便な方法で行えることを目的として、実際の台風データに基づき非線形表現が可能で自己学習能力を持つニューラルネットワーク法を採用した。

本論文では、この諸定数予測手法と数値解析を組み合わせた高潮解析を行うことで、地方自治体等の災害防止対策への活用を図る事前情報の提供等を目的とした、リアルタイム予測システムについて論じる。

なお、高潮予測計算は気象庁経験式⁴⁾との比較検証も行い、その予測精度の検討と有用性についても示す。

2. 高潮現象の予測方法について

(1) 高潮解析手法

移動性低気圧に伴う気象擾乱の空間スケールは水深の大きさに比べて非常に大きいため、長波近似が可能であることから、鉛直方向の水圧分布を静水圧分布に近似して、次式で示される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

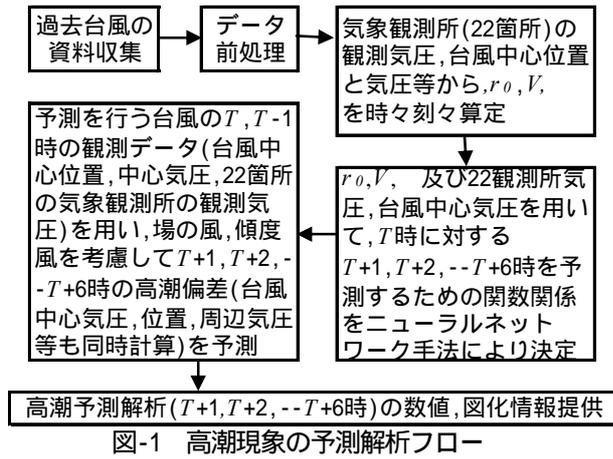


図-1 高潮現象の予測解析フロー

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{d} \right) + gd \frac{\partial}{\partial x} (\eta - \eta_0) = fN + \frac{\tau_s^{(x)}}{\rho_w} - \frac{\tau_b^{(x)}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (1b)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{d} \right) + gd \frac{\partial}{\partial y} (\eta - \eta_0) = -fM + \frac{\tau_s^{(y)}}{\rho_w} - \frac{\tau_b^{(y)}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (1c)$$

ここに, t : 時間, x, y : 東方向, 北方向軸の平面直交座標, η : 海面上昇量, η_0 : 気圧低下による海面上昇量, d : 全水深 ($d = H + h$), A_h : 水平渦動粘性係数 $= (L)^{4/3} \nu$, $\nu = 0.01 \sim 0.05$, $L = 2\text{km}$, f : コリオリ力 $(= 2 \sin \phi)$, ϕ : 地球自転の角速度 $= 7.29 \times 10^{-5} \text{rad/s}$, ϕ : 計算地点の緯度, $\tau_s^{(x)}, \tau_s^{(y)}$: 暴風による海面剪断応力の x, y 成分である。

また, 気圧推定式は下記のMyersモデルを用い, 台風域の風速設定は台風の移動速度に伴う場の風と気圧勾配から生じる傾度風のベクトル和として設定した。

$$P(r) = P_c + P \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (2)$$

ここに, $P(r)$: 台風中心から r 離れた地点での気圧, P_c : 台風中心気圧, P : 気圧深度 ($P_\infty - P_c$), r_0, r : 最大台風半径 (km), 台風中心からの距離 (km), P_∞ : 台風域の外側の周辺気圧 である。

高潮計算を行う場合, 気圧推定式における気圧深度 (P) や最大台風半径 (r_0) 等を実際に来襲した台風記録から算定し, その定数を用いることで再現解析を行っている。

このため, 台風来襲前に任意地点の高潮現象を予測するためには, その対象とする台風におけるこれらの諸定数をあらかじめ予測し, その条件の下で検討することが必要となる。

(2) 予測解析の手順と方法

高潮現象を事前に推定するためには, 気圧推定式(2)の諸定数やその台風の今後の進路等を予測する必要がある。

ここで, 周辺気圧 P_∞ は過去の実績値から統計的に事前

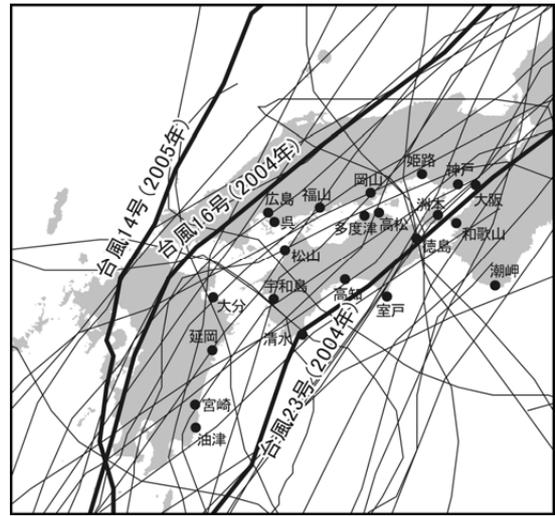


図-2 既往台風経路と台風16号・23号・14号の通過経路

設定が可能である。また, 他の諸定数設定も極力簡便な手法を用いることができれば, 予測解析に要する時間も短縮できる。よって, 本検討では過去の実績台風資料に基づいて, ニューラルネットワーク法によりあらかじめ諸定数を自動設定できるようにシステム処理を行った。

ニューラルネットワーク法は学習機能による自己組織化能力を備えているため, 良質な入力信号(データ)と答えを与えて学習することで, 任意の入力信号に正しく対応できるものである。本検討では, 教師付き学習アルゴリズムであるバックプロパゲーション法(以下, BP法と言う。)を用い, 自己最適化ニューラルネットワーク法を採用した。BP解析モデルは入力層, 中間層, 出力層の3層構成で, 中間層ニューロン数は推定する定数によって異なるが, 学習完了時で概ね5~6個である。また, 学習回数は教師値と出力値の誤差が最小となるまで繰り返した。

この高潮予測解析におけるデータの前処理等, 解析の一連の流れは図-1のフローチャートに示すとおりである。

予測を行う台風の T 時を基準として, $T+1, T+2, \dots, T+6$ 時の高潮偏差(同時に台風の中心位置, 中心気圧, 周辺域の気圧分布, 風速等)を予測するものであり, その予測時間は前述したように実際に被害を受けた地元住民等からの意見に基づいて, 6時間先までとした。

(3) 予測解析のための諸定数の設定とその再現精度

a) 諸定数の設定

予測解析に際し, 事前に以下の諸定数を推定する。

なお, 定数推定は過去14年間(1991~2004)に四国地方周辺を通過した34個の実績台風資料を用いた。

BP法によるシステム化の前処理として, 以下の基本値を設定あるいは算定する必要がある。

P_c : 過去の実績台風の毎時刻の中心気圧を用いる。

r_0 : (2)式を用いて台風中心気圧と周辺気象観測所(全22箇所, 図-2)の気圧から, 台風毎に時々刻々算定する。

台風の移動速度 V と移動方向角 θ : 任意時刻 T と $T-1$ 時

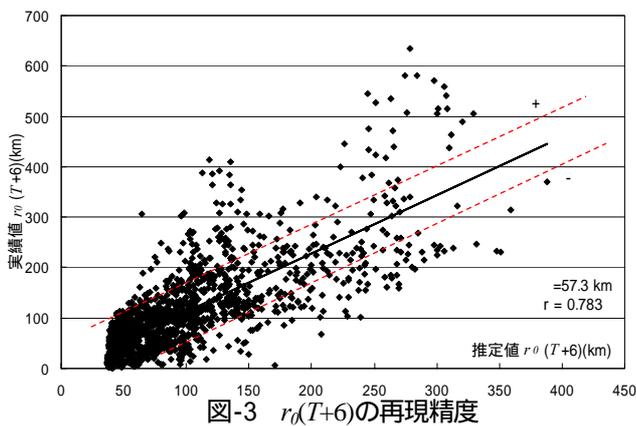


図-3 $r_0(T+6)$ の再現精度

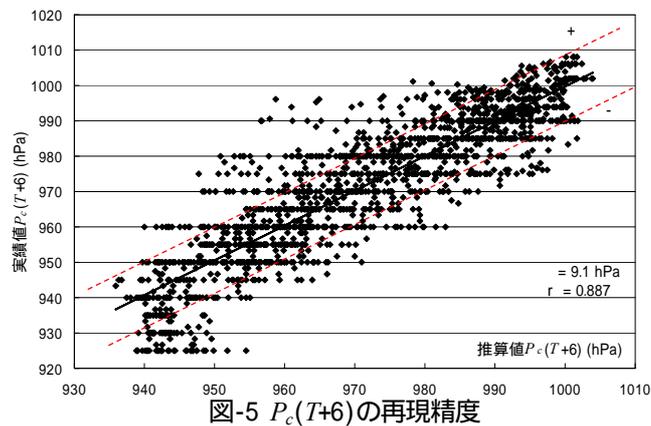


図-5 $P_c(T+6)$ の再現精度

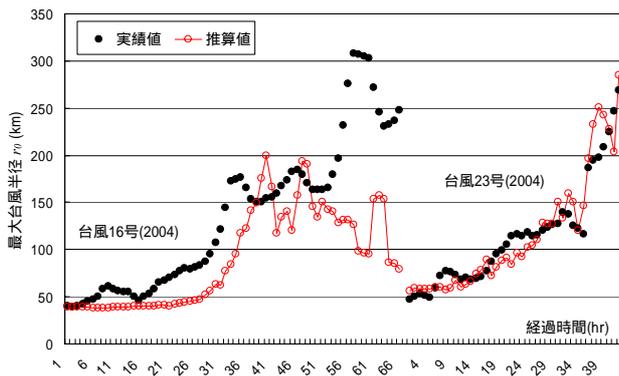


図-4 $r_0(T+6)$ の推定状況

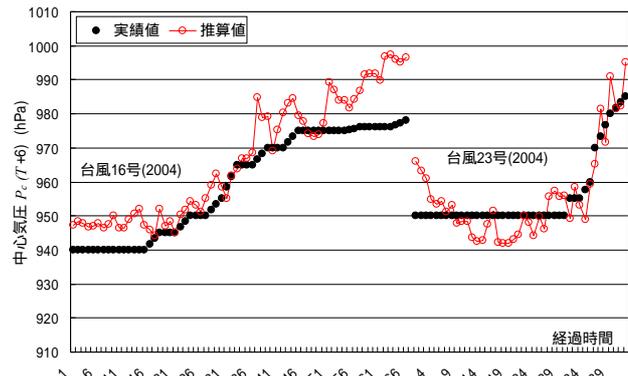


図-6 $P_c(T+6)$ の推定状況

の台風中心位置から、移動速度 V を求め、 T と $T+i$ 時の台風中心位置から移動方向角度 θ_i を求める。

なお、 r_0 算定時の台風域外側周辺気圧 P_o は、前述したとおり過去の台風時の気圧配置図より読み取り、その平均値処理を行い、各月15日の周辺気圧として設定し、予測解析システム中で自動処理されるように配慮した。

b)再現精度

BP法により任意時刻 T から6時間先までを予測計算するため、 T 時の諸定数を用いて $T+1, T+2, \dots, T+6$ 時の各諸定数を推定した。

図-3には、例えば r_0 に関する $T+6$ 時刻の推定精度を示した。実績値と推算値の誤差の標準偏差は50km程度である。また、その経時変化は、例えば図-4に示すとおりである。

図-3で両者の関係はある幅を持って分布しており、実績値の r_0 の変化に追従できず、図-4に示すとおり台風の衰退期に台風半径が急激に増加し推算値が実績値と大きく異なる結果を示す場合がある。このことは、高潮予測計算において予測偏差が急激な変化を呈する等の要因ともなっており、今後精度向上等改良の余地を残すものであり、詳細は後述する予測解析の検証結果において述べる。

また、同様に P_c の実績値と推算値の比較結果を図-5, 6に示す。実績値と推算値のばらつきは小さく、誤差の標準偏差は9.1hPaである。

上記の特性を踏まえた上で、過去の台風データからBP法に基づき学習・構築したシステムを用いて、 P_c, r_0, V , 等予測定数を求め、高潮予測解析を実施する。なお、気

象庁経験式を用いた計算では、偏差の予測解析(図-8等)では数値解析結果の気圧、風速を用い、潮位変動の再現解析(図-7等)では実績気圧、風速を用いた。

3. 高潮現象の再現と予測解析

(1) 概要

高潮現象の再現と予測解析の例として、図-2に経路を示した平成16年台風16号、23号および平成17年の台風14号の結果を示す。なお、台風16号、23号はBP法による予測システム構築時の学習データとして使用していることから、再現解析的な取り扱いとなるが、任意の T 時から $T+6$ 時間先までの予測解析を行い、実績値および予測値を比較することで、その計算精度について照査する。

また、台風14号については、システム構築時の学習データとして用いていないことから、本システム適用の可能性について照査できるケースである。

なお、高潮解析は村上ら⁵⁾が提案したADI法を採用した。計算領域は、四国を囲む北緯 $32.5^\circ \sim 34.7^\circ$ 、東経 $130.7^\circ \sim 135.5^\circ$ の範囲の太平洋、紀伊水道、瀬戸内海および播磨灘海域とし、2.0kmメッシュサイズとした。

(2) 台風16号・23号および14号の再現と予測解析結果

a) 台風16号の再現・予測解析結果

平成16年8月30日午前9時半頃鹿児島県に上陸し、九州を縦断後山口県に再上陸し、勢力を維持したまま日本海へ抜けた(図-2)が、夏季の大潮期間に近かったことから、

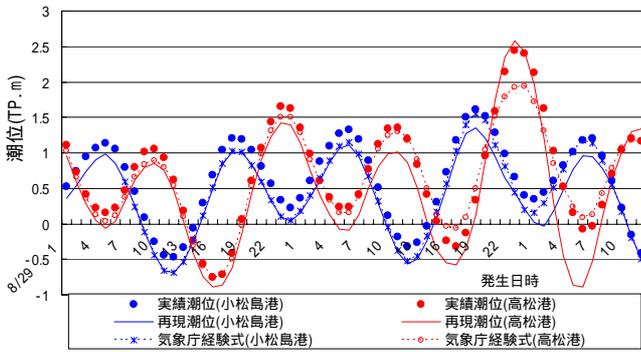


図-7 小松島港・高松港の潮位変動再現結果(台風16号)

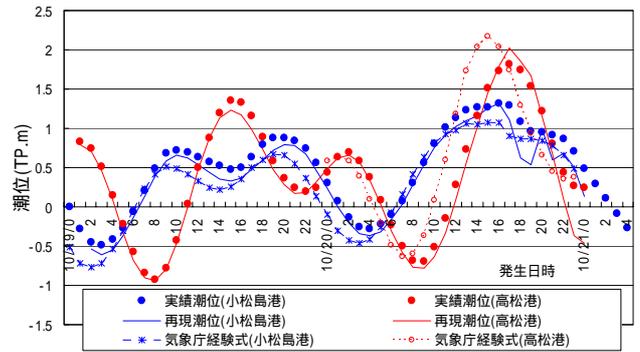


図-10 小松島港・高松港の潮位変動再現結果(台風23号)

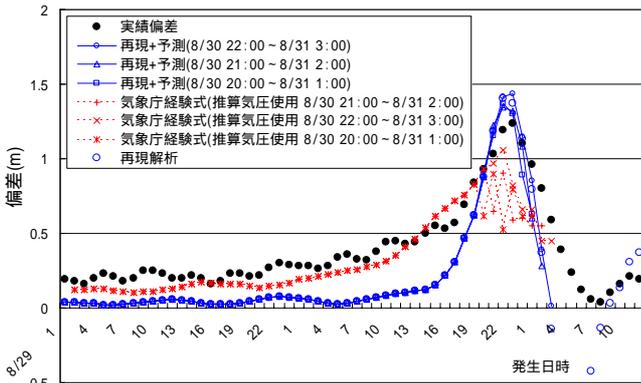


図-8 高松港の偏差予測解析結果(台風16号)

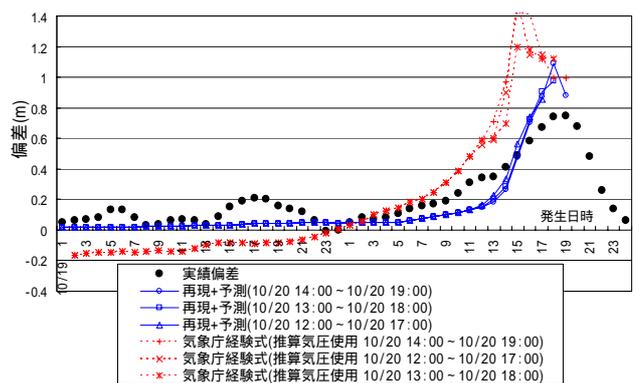


図-11 高松港の偏差予測解析結果(台風23号)

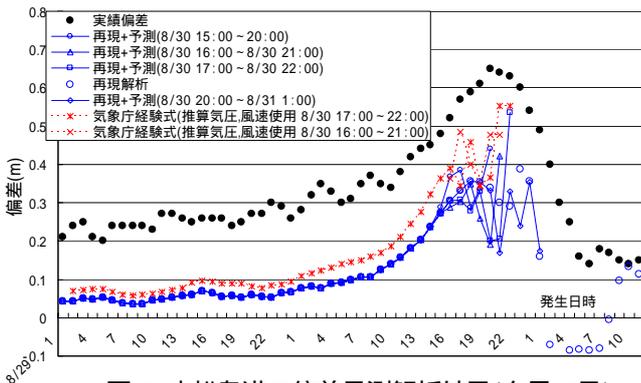


図-9 小松島港の偏差予測解析結果(台風16号)

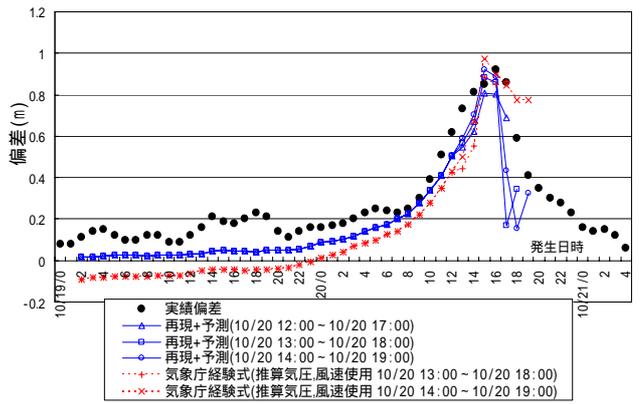


図-12 小松島港の偏差予測解析結果(台風23号)

過去の極値を越える極めて高い潮位を示し、四国、中国地方を中心とする瀬戸内海沿岸で床上、床下浸水被害が発生した。この台風16号による小松島港ならびに高松港の高潮現象の再現解析結果を図-7に示す。高松港での数値解析によるピーク発生時刻やピーク値の再現性は非常に良好である。一方、小松島港においては、ピーク発生時間帯は再現できているが、ピーク値自体は約0.19m程度実績値より低く推定されている。なお、台風接近の数日前から太平洋沿岸で異常潮位により既に20cm程度の偏差が出現しているが、この現象は再現解析には反映されていない。

次いで、この数値解析モデルを用いて高潮ピーク発生時間を含む6時間先までの偏差予測解析結果を、図-8,9に示す。両地点の最大偏差発生時間のずれに配慮して、予測開始時刻を1時間ずつずらした3ケース程度について検討した。両者とも予測開始時刻によらずピーク値やピーク

発生時刻の予測結果には殆ど差が現れていない。

一方、気象庁経験式による予測結果では場所の違いによる明らかな推定精度の差が生じている。数値解析モデルによる本システムによれば、このような推定差が小さいことから、本システムの適用性は十分認められるものと考えられる。

b) 台風23号の再現・予測解析結果

平成16年10月20日午後4時頃、台風23号は徳島県阿南市を通過し、紀伊水道から大阪府に上陸、東海・関東地方を縦断して(図-2)、その後温帯低気圧に変わった。台風と前線による影響で各地に大雨による洪水氾濫被害をもたらした。この時の小松島港、高松港における高潮現象の再現解析結果を図-10に示す。

次いで、数値解析モデルによる両港の6時間先までの偏差予測解析結果を図-11,12に示す。

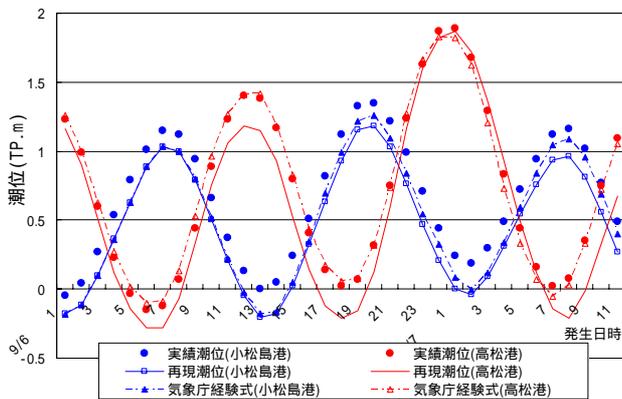


図-13 小松島港・高松港の潮位変動再現結果(台風14号)

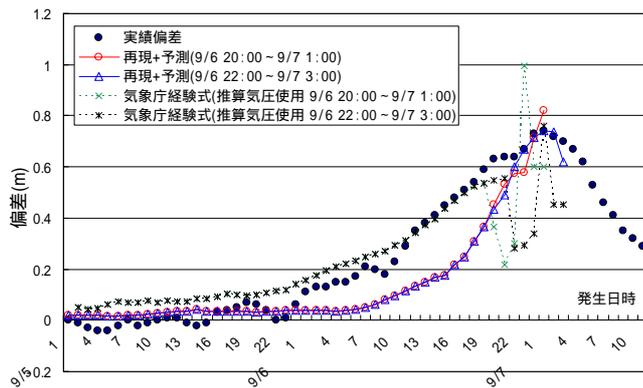


図-14 高松港の偏差予測解析結果(台風14号)

これによれば、高松港では予測偏差は0.3m程度高めの値として求められたが、予測開始時刻の違いによらず、ほぼ一定の予測値が得られている。一方、気象庁経験式によれば、予測値は0.60m以上高く推定され、かつピーク発生時刻も2～3時間程度先行して推定されることから、実績値との整合性は非常に劣っている。また、小松島港の予測結果は、数値解析モデルによればピーク発生時間は1時間程早く、ピーク値は実績値とほぼ同じである。一方、気象庁経験式では、ピーク値やその発生時刻は数値解析モデルの結果に比べてやや劣るとともに、時間の進行に伴い予測値がさらに上昇するような傾向がうかがえることから、数値解析モデルの適用性が勝っているものと判断される。

c) 台風14号の再現・予測解析結果

平成17年9月6日、強い勢力を保ったまま長崎県に上陸し日本海に抜けたが、上陸後も進行速度が上がらず、長時間降雨をもたらした。なお、本台風の進行コースは平成16年台風16号に類似している。(図-2)

図-13には両港の高潮現象の再現解析結果を示す。これによれば、高松港における高潮現象は数値解析モデルで良く再現されているが、小松島港におけるピーク値は実績値より0.17m程低いものとなった。

また、図-14, 15には両港の偏差予測解析結果を示す。高松港の数値解析結果においては、実績値に対して0.05m程度の誤差で推定されており、ピーク値発生時間のずれも

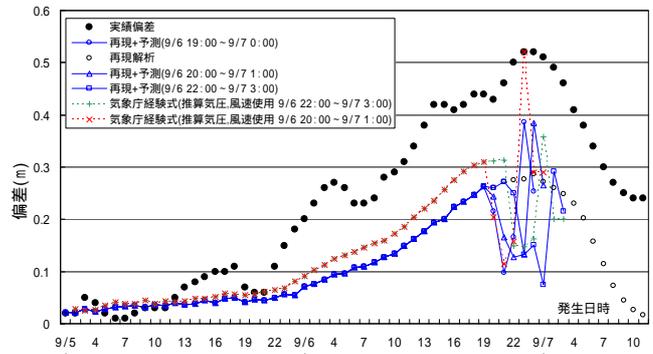


図-15 小松島港の偏差予測解析結果(台風14号)

生じていない。一方、小松島港では再現解析による偏差のピーク値は0.2m程低く求められた。これは、波浪によるsetupの影響を考慮していないため、潮位が低めに見積もられたものと考えられる。また、予測開始時刻をずらした解析結果を比較すると、ピーク発生時刻は2時間程度前後するところがあるが、なによりも予測値自体が大きく上下変動する状況が見られる。これは先にも述べたとおり、BP法による諸定数推定結果において、実績値に対する推算値の精度が劣る場合に相当するものであることから、予測精度に十分留意しなければならないケースである。

一方、気象庁経験式による推算結果では、高松港・小松島港とも予測開始時刻の違いによるピーク値発生時刻の変化は勿論、ピーク値自体に数値解析結果以上の大きな変動が見られる。

以上のように、台風14号の高潮現象の予測解析において、数値解析モデルとして構築した本システムの予測結果を示すとともに、気象庁経験式を用いた比較検証を行ったが、予測開始時刻の違い等によって予測値は再現値の上下を変動する結果となるが、その得られた値や変動傾向に基づけば、本システムを用いることで、より適切な予測値を得ることが可能である。

4. 予測精度の評価

これまでの予測解析結果の精度を評価すると、表-2に示すとおりである。この精度評価は、実績偏差に対する再現解析偏差と再現解析偏差に対する予測解析偏差、それぞれの差(誤差(再現)および誤差、)がどれほどばらついているかを示すものである。

これによると、再現解析ならびに予測解析によるピーク値発生時刻は実績と同時刻または1時間程度のずれである。さらに偏差の最大値が出現する前後1時間、合計3時間程度において、予測解析による最大偏差は再現解析による最大値と10cm程度の推定誤差で求められている。

この誤差は、予測開始時刻が異なることに起因するものであるが、台風14号は予測システム構築時の学習データに含まれていないことから、本システムを用いた場合の予測精度と解釈できる。

ここで、台風14号における小松島港の予測解析結果に見られる振動的現象の解消方法としては、BP法の学習精

表 - 2 偏差予測精度の評価結果

台風名	港名	発生日時	実績偏差 (m)	再現解析 (m)	予測偏差 (m)	予測偏差 (m)	予測偏差 (m)	誤差(再現) (m)	誤差 (m)	誤差 (m)	誤差 (m)	備考
台風16号 (H16)	小松島港	8/30 19時	0.61	0.350	0.336	0.258	0.329	0.260	0.014	0.092	0.021	()内数値は22時
		20時	0.65	0.340	0.440	0.192	0.202	0.310	0.100	0.148	0.138	
		21時	0.64	0.300	-	0.422	0.205(0.535)	0.340	-	0.122	0.095(0.235)	
	高松港	8/30 22時	1.19	1.402	1.418	1.346	1.374	0.212	0.016	0.056	0.028	
		23時	1.24	1.374	1.438	1.321	1.301	0.134	0.064	0.053	0.073	
		8/31 0時	1.10	1.134	1.146	1.084	0.893	0.034	0.012	0.050	0.241	
台風23号 (H16)	小松島港	10/20 15時	0.85	0.838	0.807	0.884	0.923	0.012	0.031	0.046	0.085	
		16時	0.92	0.917	0.805	0.860	0.888	0.003	0.112	0.057	0.029	
		17時	0.86	0.677	0.688	0.168	0.434	0.183	0.011	0.509	0.243	
	高松港	10/20 18時	0.74	0.851	1.089	0.977	0.854	0.111	0.238	0.126	0.003	
		19時	0.75	0.877	0.879	-	-	0.127	0.002	-	-	
		20時	0.68	0.611	-	-	-	0.069	-	-	-	
台風14号 (H17)	小松島港	9/6 23時	0.52	0.277	0.387	0.132	0.132	0.243	0.110	0.145	0.145	()内数値は2時
		9/7 0時	0.52	0.287	0.254	0.384	0.151	0.233	0.033	0.097	0.136	
		1時	0.51	0.272	-	0.266	0.075(0.292)	0.238	-	0.006	0.197(0.020)	
	高松港	9/7 0時	0.73	0.678	0.714	0.715	-	0.052	0.036	0.037	-	
		1時	0.74	0.717	0.820	0.742	-	0.023	0.103	0.025	-	
		2時	0.72	0.761	-	0.737	-	0.041	-	0.024	-	

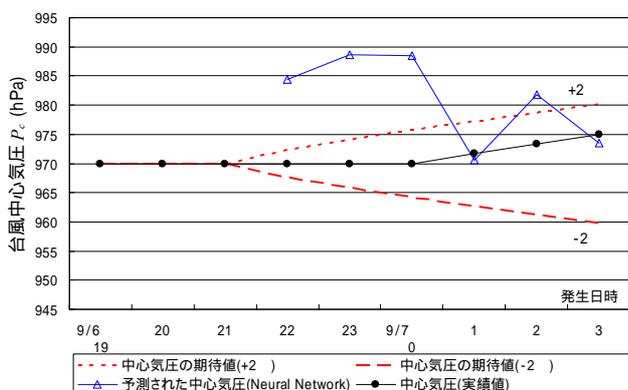


図-16 台風中心気圧の予測定数の関係(台風14号)

度向上による定数見直しや学習データの追加が考えられる。しかし、図-4,6の推算結果からも明らかに数時間内に P_c, r_0 が極端な変動を生じないことから、ここではある時刻に対して1時間後から6時間後の P_c, r_0 の差の変動量について統計分析を行った。その結果、各時間に対する標準偏差は、 P_c で1.2, 2.0, 2.9, 3.7, 4.4, 5.1hPa, r_0 で15.6, 27.3, 36.5, 44.6, 51.3, 56.5kmであった。ここで、予測定数値がこの ± 2 以内ではそのままの値を用い、これを越える場合には ± 2 を限度として再設定することとした。例えば P_c についてその関係を示せば、図-16のとおりである。また、その予測解析結果は、図-17に示すようになる。予測開始後数時間の偏差の急激な変動は改善されるが、後半の時間帯ではまだ不十分であり、改善の余地がある。なお、予測精度をより一層高めるためにも、解析メッシュ等の自由度を高め、再現解析精度を向上させる必要もある。

5. おわりに

本検討では潮位観測地点を選択したが、県市等自治体 が所管する沿岸部では潮位観測所はほとんど設置されておらず、また現実的にも配置は困難でもある。このため、高潮現象を予測し、かつリアルタイムに得ることが出来れば、しかも市販のパソコン等で比較的短時間に予測計算ができることは、防災対策等その対応において非常に

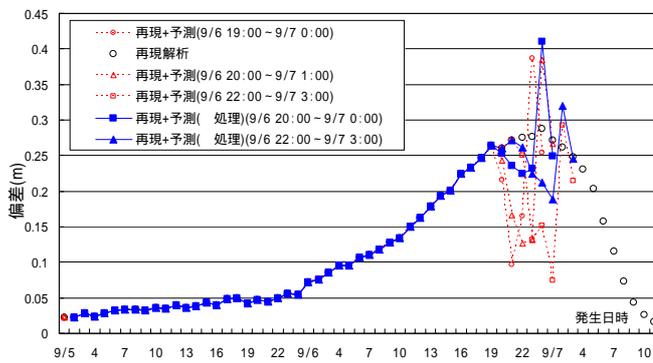


図-17 小松島港の偏差予測解析結果(台風14号)

有益である。しかしながら、本手法は高潮偏差を予測していることから、実際の高潮予報においては潮位が必要である。地方港等沿岸部で調和定数の不明な地点では、潮流解析によるか実際の潮位観測に基づく調和定数の算定が必要である。現在、地方港においてこの調和定数の解析も進めている。

今後、本システムを基本として、さらに予測定数の推定精度を高める等、残された課題解消を図るとともに、現場レベルでの実用化を目指したシステム構築を進めたい。

参考文献

- 鈴木 武：台風0416号高潮による家屋・公益施設の被害の状況 - 高松市を中心にした整理 - , 国土技術政策総合研究所資料, No.268, 28p, 2005.
- 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, 25p, 2004.
- 河合弘泰：沿岸防災を目的とした高潮推算技術の高度化について, 港湾空港技術講演会講演集, pp.21-43, 2006.
- 平成17年(2005年)気象の暦 - 四国地方版(香川・徳島・高知・愛媛) -, (財)日本気象協会
- 村上和男, 森川雅行, 堀江 毅：ADI法による高潮の数値計算法, 港湾技研資料, No. 529, pp.1-35, 1985.

(2006.9.30受付)