

徳島県北部沿岸での高潮のリアルタイム予報 システムの検討

INVESTIGATION ON REAL-TIME FORECASTING SYSTEM OF STORM SURGE AT THE NORTHERN TOKUSHIMA COAST

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) 徳島大学准教授 環境防災研究センター (〒770-8506 徳島市南常三島2-1)

³須賀工業株式会社 大阪支店 設計部 (〒550-0001 大阪市西区土佐堀1丁目2-30)

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)

We investigated the real-time forecast system of a storm surge to reduce its disaster. Typhoon properties such as central atmospheric pressure were forecasted before several hours by two methods. The one is forecasting by using neural network technique based on the past typhoon data and the other is utilization of typhoon forecast information by the Meteorological Agency. As a result of the comparison of both methods, it was found that the latter gave more correct forecast of typhoon properties. Based on the forecasting values of typhoon, we carried out the real-time forecasting of a storm surge and examined the practical utility of this system.

Key Words : real-time forecast, storm surge, the Meteorological Agency, neural network system

1. はじめに

2004年は過去最大の台風来襲数を示し,中でも四国地方や瀬戸内海沿岸地域では台風16,18,23号などによる内水氾濫,高潮被害が多発した.その後も台風の被害は発生し,昨今では台風規模の大型化も懸念されている.

このように災害の発生や被害の大規模化が予期されている現状では,地域住民に高潮や洪水の予報値を即時提供することは,住民の避難行動等の判断材料として非常に有益である.ここで,徳島県沿岸部での高潮予報を行う場合,太平洋,紀伊水道,播磨灘海域では潮位観測所(阿波由岐,小松島,高松,いずれも気象庁所管)の観測値を活用できるが,徳島県北部の播磨灘と紀伊水道を結ぶ小鳴門海峡とその周辺部は,複雑な地形形態と紀伊水道と播磨灘の両側から潮汐波と高潮が伝搬する特異性を有しているため,海峡部沿線の高潮予測が困難な海域である¹⁾.

また,これまでの高潮のリアルタイム予測に関する研究^{2),3)}においても,台風進路の設定や刻々と変化する台風中心気圧,台風半径の推定等,事前予測の難しい事象が残されている.さらに,内湾の海上風の推算には地形の影響も考慮する必要性も指摘されている⁴⁾.

一方,自治体が行う住民への避難情報の提供や水防活動では,地域に密着したリアルタイムの高潮予報値が事務所のパソコン等で短時間に得られることは有用である.

その場合には精度を若干犠牲にしても,簡単な操作で所要時間内に予報値が得られるシステムの構築が必要である.本論文では,この簡易システムについて,徳島県北部沿岸域を対象として,実際の台風を例にその予測方法と予報結果を示すものである.

2. 高潮のリアルタイム予報

(1) 高潮のリアルタイム予報の方法

台風来襲時に今後の高潮状況を数時間前に予報する場合,この数時間先までの間の台風諸元をどのように設定するかによって予報値が異なる.この台風諸元の設定には,多変量解析やカルマンフィルター等の方法が挙げられるが,ここでは自治体防災担当者が短時間に比較的簡便に扱えることを目的として,台風諸元の設定を以下の2方法について検討した.なお,この台風諸元とは,台風中心気圧(P_c),台風半径(r_0),台風移動方向(θ)及びその速度(V)のことである.

ニューラルネットワーク法(以下,N-N法と呼ぶ)を活用した設定方法⁵⁾

過去の台風データを教師データとし,数時間先の台風諸元を設定する.

気象庁発表による台風情報を利用した設定方法

気象庁が発表する任意時刻の台風情報と今後の予測値

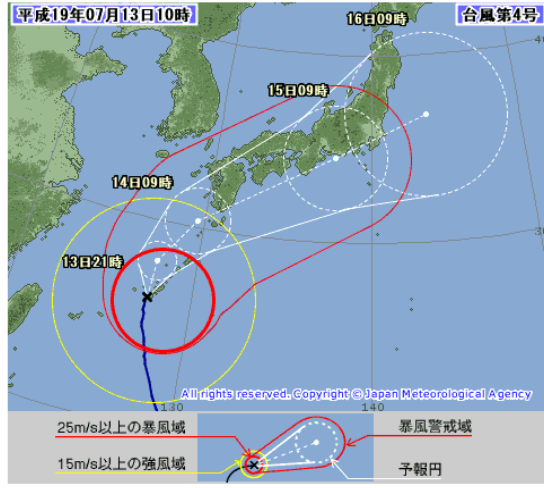


図-1 台風4号の通過予想経路⁶⁾

(例えば図-1に示すように、現在の台風中心位置、中心気圧と今後3時間毎で24時間先までの予報値)を基に、数時間先までの台風諸元を設定する。

(2) 高潮の解析手法

高潮解析手法としては、簡易な計算方法(気象庁経験式⁷⁾)等も提案されているが、ここでは任意地点を対象とした計算を行うことを目的とすることから、数値解析法を採用する。高潮解析の基礎式は、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。

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

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

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

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($d = \eta + h$)、 h ：水深、 A_h ：水平渦動粘性係数 $= \alpha (L)^{4/3}$ 、 $\alpha = 0.01 \sim 0.05 \text{ cm}^{2/3}/\text{s}$ 、 L ：格子長(標準格子長は2km)、 f ：コリオリ力($= 2\omega \sin \varphi$)、 ω ：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、気圧推定式は下記に示す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。

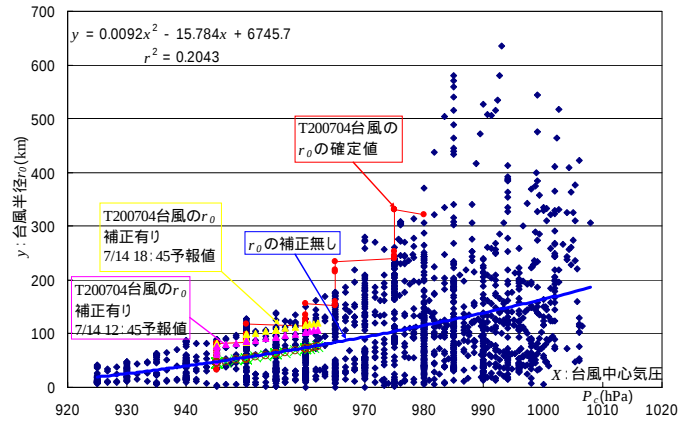


図-2 台風半径(r_0)と中心気圧(P_c)の関係

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

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、 ΔP ：気圧深度($P_\infty - P_c$)、 r_0, r ：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。なお、高潮解析は村上ら⁸⁾が提案したADI法を採用し、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、メッシュサイズは2kmである。さらに、紀伊水道と瀬戸内海を結ぶ小鳴門海峡は、メッシュサイズをその外洋領域の1/3として細分設定する。

(3) 高潮解析条件の設定と予測解析の手順

高潮解析を行う場合、(2)式で示される気圧推定式において、気圧深度(ΔP)や台風半径(r_0)が必要である。

このため、前述の各設定方法では、それぞれ次に示す手順に基づいて高潮の予測解析を実施した。

の方法では、過去に四国地方周辺部を中心として来襲した台風データ(1991～2004年までの全34台風)を用いてN-N法によって算定した関係式に基づき、予測開始時刻の気象データ(台風中心気圧 P_c 、台風半径 r_0 、台風中心位置 x, y 等)を与えて、6時間先までの台風諸元を推定し、高潮解析を実施する。

の方法では、気象庁が発表する3時間刻みの台風予報値を用いて、台風中心気圧(P_c)と周辺気圧(P_∞)との差から気圧深度(ΔP)の設定を行う。また、台風半径(r_0)は上記の34台風の台風半径(r_0)の推算値(確定値)とそれぞれの台風中心気圧(P_c)との関係式を作成し、この関係式から予測開始時刻における r_0 の値を推定し、これを予測値 r_0 として設定する。なお、周辺気圧(P_∞)は上記のデータ期間における各月の平均気圧値を代表値として設定する。

ここで、図-2にはこの P_c と r_0 の関係を示す。

図中の推定式は最小二乗法により決定された台風半径(r_0)と台風中心気圧(P_c)の関係を示したものである。台風中心気圧(P_c)の分布に比べ台風半径(r_0)の分布が広範囲に及ぶため、良好な推定式とは言い難い($r=0.45$)。このことより、予測値 r_0 と確定値 r_0 の値が大きく異なる可能性が

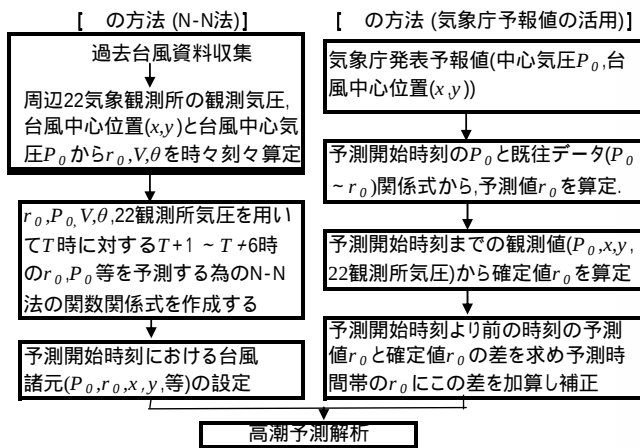


図-3 台風来襲時の高潮解析手順



図-4 高潮予報地点

ある。よって、高潮の予測解析時には、その台風の確定値 r_{0T} を用いて、(3)式に基づき予測値 r_{0M} の補正を行った。

$$r_{0YT} = r_{0T} + (r_{0KM} - r_{0M}) \quad (3)$$

ここに、 r_{0YT} ：T時の予測解析に用いる台風半径 r_{0T} 、 r_{0M} ：図-2から求めたT時の予測値 r_{0M} 、 r_{0KM} ：観測値から求めたM時($M < T$)の確定値 r_{0M} 、 r_{0M} ：図-2から求めたM時の予測値 r_{0M} 、T：予測解析時刻($T=1,2,3,-$)、M：予測解析時刻より前の時刻で、観測値が得られる時刻である。

この考え方と手順を図-3のの方法として示す。また、この確定値 r_{0T} と補正後の r_{0M} の分布について、平成19年台風4号を例として図-2に併記した。予測開始時刻にもよるが、予測値 r_{0M} を確定値 r_{0T} に基づいて補正することにより、数時間先までの間の確定値 r_{0T} と近似することから、高潮の予測解析結果の精度向上を期待できるものである。なお、その効果検証は後述する高潮予報の適用結果に示す。

また、高潮予報地点の天文潮位は、主要沿岸地点では公表⁹⁾されている調和定数を用い、他の地点では潮流解析や現地での潮位観測に基づく調和定数の算定を行い、予報時の天文潮位の設定が可能となるよう、事前準備を行う必要がある。本論文では、高潮予報地点(図-4)とする小松



図-5 台風進路の予測設定

島(紀伊水道)、阿波由岐(太平洋)は気象庁資料を用い、瀬戸内海から小鳴門海峡に位置する粟田、北泊(瀬戸内海)、堂浦(小鳴門海峡)については、現地での約1年間に及ぶ潮位観測データに基づく60分潮の調和定数¹⁾を用いた。

3. 高潮予報の適用結果

(1) 対象とする台風の概要

ここでは、高潮解析による潮位予報を行う台風として、平成18年台風13号と平成19年台風4号を取り上げる。

台風13号は、平成18年9月10日フィリピンの東海上で発生し、その後北上を続け17日には強い勢力を保ったまま長崎県佐世保市付近に上陸し、17日午後8時過ぎに日本海に抜け北北東に進み、日本海西部で低気圧に変わった。この時の高潮偏差は小松島で0.44m、阿波由岐で0.36mであった。一方、台風4号は平成19年7月9日フィリピンの東海上カロリン諸島で発生し、沖縄本島付近を北上して14日午後2時頃に鹿児島県大隅半島に上陸し、強い勢力を保ったまま北東に進み、14日夜から15日明け方にかけて四国地方の南海上を通過し、太平洋上を北東に進み17日に温帯低気圧に変わった。この台風4号は、大隅半島上陸時の中心気圧945hPa、その後も960hPa、中心付近最大風速40m/sと、1951年以降統計を取り始めて以来7月では過去最大勢力を記録した。この時の高潮偏差は小松島で0.38m、阿波由岐で0.47m程であった。過去最大の台風規模であったが高潮災害も無く、四国地方の南海上を通過するコースをたどったことにも恵まれたものである。

(2) 台風コースの設定方法

N-N法による予測解析は、予測開始時点の台風中心気圧(P_c)、中心位置(x, y)、高潮解析領域内の複数の気象観測所観測気圧を用いて、過去の台風諸元を教師データとして作成した関係式から今後の台風諸元を推定する。しかし、台風進路は気圧配置等が強く影響するため、過去の台風データの気圧配置と近似した台風からの進路推定は現在の進路に対し誤差を生じやすい。次いで、気象庁予報値を活用した台風諸元の設定方法について、図-1の平成19年台風4号を例として示す。気象庁発表(例えば7月13日10

表-1 予測解析条件とその検討ケース

予測方法	の方法	の方法					
台風コース	-	北寄りコース		中心コース		中心コース	
予測開始	6時間前	12時間前		6時間前		12時間前	
予測条件	-	r_0 補正無	r_0 補正有	r_0 補正無	r_0 補正有	r_0 補正無	r_0 補正有
H18年台風13号	ケース	-	-	ケース	ケース	-	-
H19年台風4号	ケース	ケース	ケース	ケース	ケース	ケース	ケース

表-2 台風進路による高潮偏差の発生状況

(7月14日 12:45気象庁発表予報値時点)

予報地点	北寄りコース			中心コース		
	ケース			ケース		
	最大偏差	発生日時		最大偏差	発生日時	
小松島	0.528	7/15 5		0.71	7/15 5	
粟田	1.334	7/15 7		0.701	7/15 7	
阿波由岐	0.353	7/15 4		0.524	7/15 5	

表-3 予測解析結果一覧(平成18年台風13号モデル)

予報地点	観測値		再現計算		の方法		の方法			
					ケース		ケース		ケース	
	最大偏差	発生日時	最大偏差	発生日時	最大偏差	発生日時	最大偏差	発生日時	最大偏差	発生日時
小松島	0.44	9/18 0	0.267	9/18 3	0.243	9/17 23	0.189	9/18 5	0.274	9/18 5
粟田	0.62	9/18 3	0.728	9/18 4	1.245	9/18 5	0.505	9/18 6	0.731	9/18 6
北泊	0.63	9/18 4	0.721	9/18 5	1.225	9/18 5	-	-	-	-
堂浦	-	-	-	-	1.001	9/18 5	-	-	-	-
阿波由岐	0.36	9/18 1	0.18	9/18 1	-	-	0.128	9/18 3	0.174	9/18 4

表-4 予測解析結果一覧(平成19年台風4号モデル)

予報地点	観測値		再現計算		の方法		の方法			
					ケース		ケース		ケース	
	最大偏差	発生日時	最大偏差	発生日時	最大偏差	発生日時	最大偏差	発生日時	最大偏差	発生日時
小松島	0.38	7/15 0	0.559	7/15 1	0.832	7/15 2	0.529	7/15 2	0.656	7/15 2
粟田	0.43	7/15 3	0.489	7/15 4	0.762	7/15 2	0.511	7/15 4	0.646	7/15 4
北泊	0.45	7/15 3	0.452	7/15 3	0.704	7/15 2	-	-	-	-
堂浦	0.56	7/15 3	0.513	7/15 3	-	-	-	-	-	-
阿波由岐	0.47	7/15 2	0.399	7/15 2	-	-	0.39	7/15 2	0.483	7/15 2

予報地点	の方法			
	ケース		ケース	
	最大偏差	発生日時	最大偏差	発生日時
小松島	0.71	7/15 5	0.601	7/15 2
粟田	0.701	7/15 7	0.781	7/15 3
北泊	-	-	0.591	7/15 3
堂浦	-	-	0.659	7/15 3
阿波由岐	0.524	7/15 5	0.535	7/15 5

時予報)によれば、今後台風は徳島県を始め四国地方を縦断する可能性が示されている。また、台風接近時刻と満潮時刻との重なりも予想されることから、四国東部の太平洋、紀伊水道、瀬戸内海の各沿岸域における高潮発生に着目し、今後台風が予報円の中心を進む場合と予報円の中心から北寄りを進む場合の2進路を想定する。この北寄りコースは、予報時刻における予報円半径の1/2の距離だけ予報円中心から離れて通過するものと仮定する。また、気象庁発表による予報時刻以外の各時刻の台風中心位置(x, y)や中心気圧(P_c)については、予報時刻間を均等割り計算により設定する。(図-5)

このように、気象庁予報値を活用する場合、予測条件を適切に選択・設定する必要があるが、予測解析の想定ケースを自由に設定することが可能であり、その分柔軟性にも優れることから、本来の目的である地域住民等への事前情報提供の趣旨に基づけば、その利用価値も高い。

(3) 高潮予測結果

a) 検討ケース

2台風をモデルとした予測解析ケースを表-1に示す。平成19年台風4号では、の方法について予測開始時刻の

違いによる最大偏差と発生日刻の変化を分析し、これら予測方法の精度比較を行う。この予測開始時刻の設定は徳島県に最も影響を与える時刻(最大偏差発生日刻)の約6時間および12時間前を対象とした。また、台風コースの違いが各地点の高潮偏差に与える影響についても把握する。さらに、平成18年台風13号に対しても、の方法による予測計算を行い、両者の適用性の確認照査を行う。

b) 最大偏差の予測計算結果について

表-2には台風進路の違いによる地点別の最大偏差を示す。北寄りコースを取るほど瀬戸内海への影響が高まる等、その現象を明確に把握できる。表-3,4には2方法の適用結果を示す。の方法の r_0 の違いによる効果を見ると、台風13号では r_0 の補正値を使用する方が精度が良いが、台風4号では同等あるいは補正値を使用する方がやや高めの値を呈する傾向が見られる。

次いで、高潮偏差の時間変化について考察する。図-6は平成19年台風4号のN-N法に基づく高潮偏差予測結果である。小松島、粟田のいずれも予測値は観測値を超過しているが、ピーク以降では予測値は観測値と同様に低下する傾向を示している。しかし、本手法では予測値に振動現象が見られ、また最大偏差やその発生日刻を数十時間前から推定するにはやや難があり、台風来襲時の早期時点からの予測解析にはそぐわないものと考えられる。一方、気象庁による定時的な台風情報(3時間予報)を用いた予測解析結果を図-7に示す。これによれば、台風進路の想定の下、例えば最接近時の24時間前でも高潮偏差の予測が可能である。このように、予測解析における実作業として台

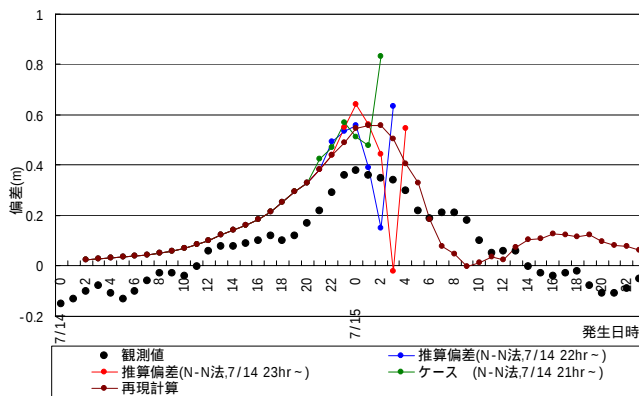


図-6(a) T200704高潮偏差予測(小松島,N-N法)

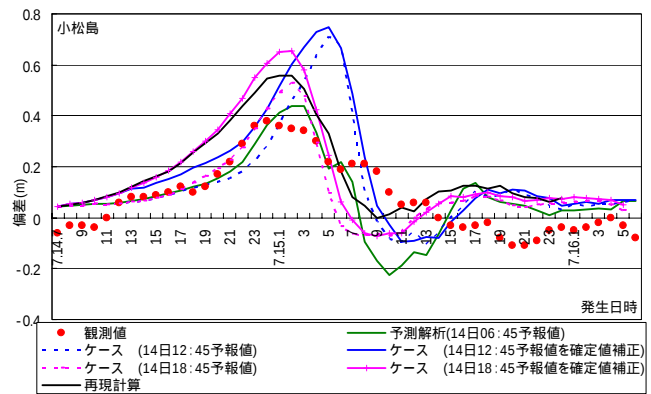


図-7(a) T200704高潮偏差予測(小松島,気象庁予報値)

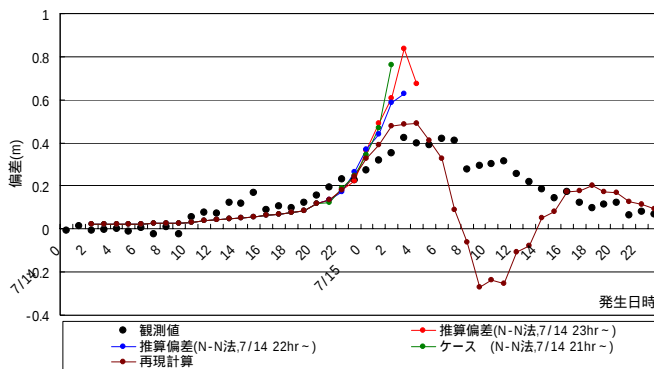


図-6(b) T200704高潮偏差予測(栗田,N-N法)

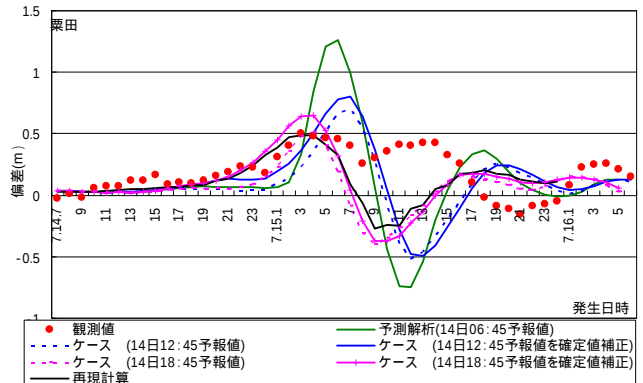


図-7(b) T200704高潮偏差予測(栗田,気象庁予報値)

風半径(r_0)と中心気圧(P_c)の関係式を用いる過程を経るが、気象庁の台風情報と周辺気象観測所の観測気圧を用いて予測値 r_0 を補正することで、実現に近い台風半径(r_0)での予測解析が行えるものである。ただし、最接近の1日前等早期の予測解析では、各地点とも最大偏差や発生時刻には観測値とずれが生じる可能性は否定できない。

また、平成18年台風13号の気象庁予報値を用いた予測解析結果について小松島、栗田を代表として図-8に示す。ただし、太平洋沿岸で発生した異常潮位を考慮して図-8(a)は0.15mを予測計算結果に加算した。この場合も、先の平成19年台風4号の結果と同様に、補正值 r_0 を用いて予測解析を行う方が、最大偏差の値や高潮偏差の時間的な変動状況についても、より一層観測値を再現できる結果が得られる。

c) 高潮潮位変動について

図-9(a)～(c)には気象庁予報を活用した予測解析結果を示す。小松島における観測潮位と予測潮位の一致度は良好である。特に、満潮時の潮位やその発生時刻も十分予測できている。一方、阿波由岐においては、潮位ピーク時で0.15m程度予測値が観測値を下回っているが、潮位変動全体としては十分な精度で予測できている。次いで、栗田の潮位変動は潮位のピーク発生時以降においても再度潮位が上昇する動きを示す等、小松島や阿波由岐のそれに比べてやや複雑な動きを見せている。また、小松島や阿波由岐に比べて5時間程度遅れて潮位のピーク値が発生し

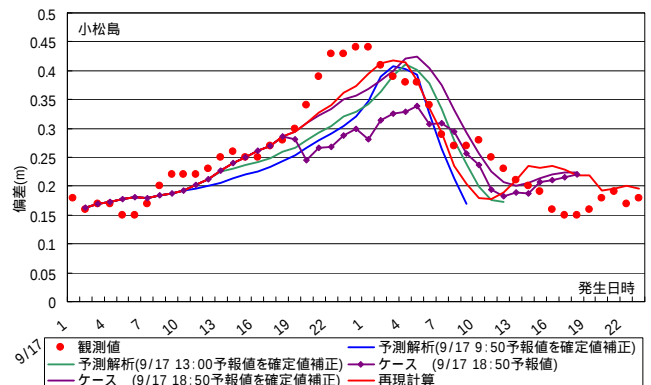


図-8(a) T200613高潮偏差予測(小松島,気象庁予報値)

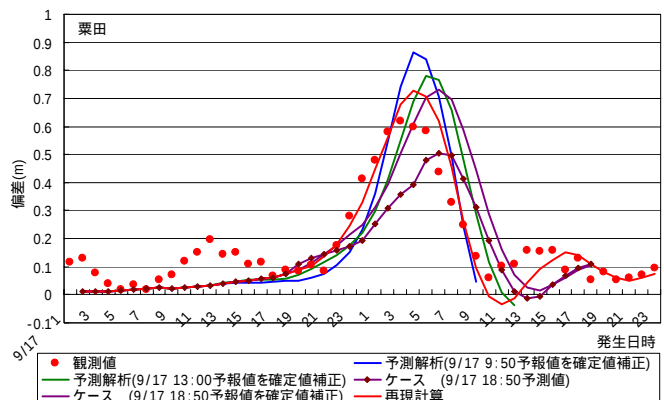


図-8(b) T200613高潮偏差予測(栗田,気象庁予報値)

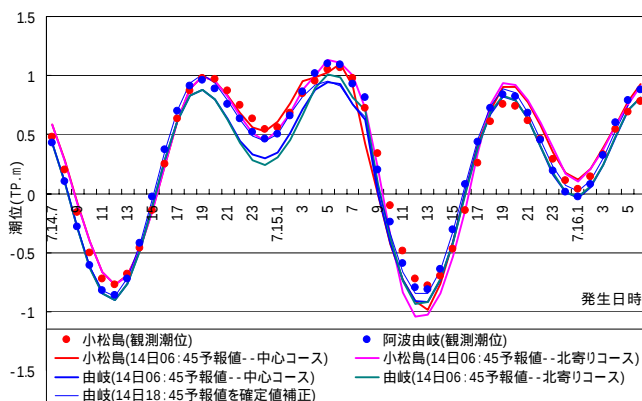


図-9(a) 高潮潮位変動予報図(小松島・阿波由岐)

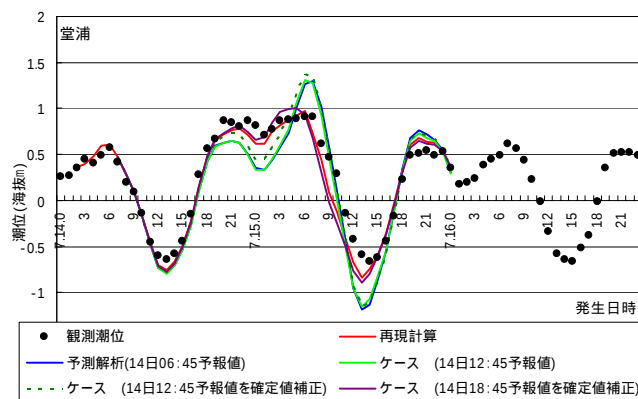


図-9(c) 高潮潮位変動予報図(堂浦)

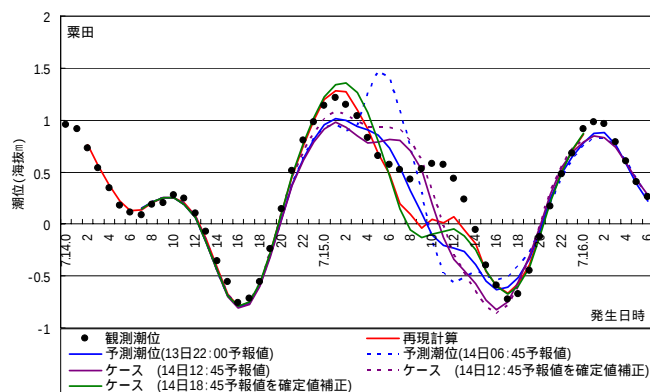


図-9(b) 高潮潮位変動予報図(粟田)

ている。一方、堂浦では、潮位ピーク値は小松島や阿波由岐と同時刻頃に発生しているが、満潮位状態が長時間続いている。これは、堂浦地点が瀬戸内海と紀伊水道を結ぶ小鳴門海峡の中に位置することから、その特異な地形的条件も影響しているものと推察される。

ここで、この2台風は予報地点に対して全くその進路が異なったものであるが、予報地点から離れた進路を取る台風による影響予測も適切に行える必要があるため、台風進路を限定しない予測精度の確保が必要である。これら5地点の最大偏差や高潮偏差の時間変動及び潮位変動の予測結果並びに事後の観測潮位との比較や再現計算結果との比較照合によれば、の方法の r_0 値を補正する解析方法がの方法に比べて優れていると考えられる。

以上のことから、気象庁が公開する台風情報を活用し、台風半径の予測値 r_0 を観測値から確定した r_0 を用いて補正する本予測システムにより、本海域における高潮予測、潮位予報が可能と考えられる。

4. おわりに

台風来襲時の高潮現象のリアルタイム予報としては幾つかの方法が考えられるが、県市等自治体が所管する沿岸部を対象とした場合、簡便で精度の高い方法の開発が望まれている。本論文では、高潮予測方法として2方法について比較検証結果を示したが、気象庁が3 時間毎に発

表する台風情報を活用し、初期段階で設定する台風半径(r_0)の予測値を実気圧配置に基づき算定した台風半径(r_0)に補正しながら高潮予測計算を逐次行うことで、その予測精度も確保できることが判明した。

なお、本システムにおける予測解析に要する時間は、解析のための前処理時間(気象庁予報値の入手及び計算データ作成等)と演算時間(例えば24時間分)を合わせて、1時間以内で処理が可能である。

今後、徳島県沿岸部の広域予報を行えるよう、本システムの充実を図りたい。

参考文献

- 1)木村剛士・中野 晋・天羽誠二・白川卓磨：潮流が卓越する小鳴門海峡における潮位と高潮の特性，海岸工学論文集，Vol.54，pp.296-300，2007。
- 2)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。
- 3)辻尾大樹・熊谷健蔵・高谷和彦・岩成伸夫：兵庫県沿岸における簡易高潮リアルタイム予測システムの開発，海洋開発論文集，Vol.23，pp.123-128，2007。
- 4)橋本典明・杉本 彰・川口浩二・宇都宮好博：局地気象モデルと第三世代波浪推算モデルの内湾波浪推算への適用，海岸工学論文集，Vol.49，pp.201-205，2002。
- 5)天羽誠二・中野 晋・木村剛士・津川 茂：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，水工学論文集，Vol.51，pp.793-798，2007。
- 6)気象庁，台風情報，(2007年7月13日閲覧)，
<http://www.jma.go.jp/jp/typh/>
- 7)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
- 8)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.529，35p，1985。
- 9)海上保安庁：書誌第742号，日本沿岸潮汐調和定数表，267p，1992。

(2007.9.30受付)