

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

REAL-TIME PREDICTION OF STORM SURGE
IN HYOGO PREFECTURE, JAPAN

辻尾大樹¹・熊谷健蔵²・高谷和彦³・岩成伸夫⁴

Daiki TSUJIO, Kenzou KUMAGAI, Kazuhiko TAKATANI and Nobuo IWANARI

¹正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株) (〒541-0052 大阪市中央区安土町二丁目3-13 大阪国際ビル)

²正会員 工博 パシフィックコンサルタンツ(株) (〒541-0052 大阪市中央区安土町二丁目3-13 大阪国際ビル)

³未会員 工修 兵庫県県土整備部 (〒650-8567 神戸市中央区下山手通5-10-1)

⁴未会員 兵庫県県土整備部 (〒650-8567 神戸市中央区下山手通5-10-1)

A lot of disaster due to the storm surge caused by the typhoon 0416 and 0418 in Hyogo Prefecture occurred. It is difficult to prevent such large-scale disaster completely. We must devise preliminary countermeasures, such as closing the floodgates and various gates, to minimize the damage. Real-time prediction of the storm surge at each port and coast is necessary to recognize highest water level and maximum variation during the storm surge. The main purpose of this study is to develop the real-time prediction model of storm surge in Hyogo Prefecture that the port managers can handle smoothly.

It was revealed that the real-time prediction model is useful and accurate by the verification of the model applied for the hind cast on the typhoons in 2004 and the forecast on the typhoon 0613.

Key Words : *Real-time prediction, storm surge, typhoon disaster, numerical estimation, Hyogo Prefecture*

1. はじめに

平成 16 年(2004 年)は, 非常に災害の多い年であり, 日本に上陸した台風は, 過去最多の 10 個を記録した。その中でも, 台風 0416 号, 0418 号は瀬戸内海沿岸において, 広範囲にわたって高潮・高波被害をもたらした。また, 台風 0423 号は, 太平洋沿岸に高波浪による海岸堤防などの海岸保全施設の崩壊や防波堤などの港湾施設の転倒, 移動といった災害をもたらした。

災害の発生に関しては, 兵庫県においても例外ではなく, 播磨灘沿岸や淡路沿岸において, 台風 0416 号, 0418 号来襲にともなう越波, 越流などによって, 甚大な高潮被害を受けた。姫路港などの検潮所で既往最高潮位を上回る潮位を観測し, 浸水被害が発生した。

このような高潮被害を完全に防ぐことは, 非常に困難であり, 高潮被害を最小限に食い止めるためには, 水門や門扉などの防潮施設の閉鎖, 土のうなどの積み上げ, あるいは, 避難勧告など, 台風が接近するまでの事前の対策が必要である。その対策を適切なタイミングで, 適切に判断するためには, 各地

域における最高潮位や最大偏差, およびそれらの生起時刻について, 正確なリアルタイムの予測が必要である。

一方, 高潮の予測計算には, 既往の観測値や推算偏差に基づいた経験式を用いる方法があり, 額田ほか¹⁾のように, 既に, 予測システムとして, 開発されているものもある。しかし, 経験式による方法は, 計算時間は非常に短いという利点はあるが, 対象地点が限られることに加え, 最大偏差の値やその生起時間の精度などに問題がある場合があると指摘されている(河合・富田²⁾)。

また, 高潮予測計算には, 流れの運動方程式を数値計算モデルで解く方法もあり, 計算モデルを用いたシステムを提案しているものもある(例えば, 中平ほか³⁾)。計算機や計算領域, 数値計算モデルによっても変わるが, 現在の普及型パソコンで数分～数時間程度での予測が可能となっている。

高潮予測計算について, これまでに, さまざまな研究が行われてきたが, 港湾や海岸の管理者が, 実際に水防活動のために, 高潮予測計算を行うような例は少ない。

本研究では, 兵庫県沿岸(特に, 播磨灘沿岸と淡路沿岸)を対象として, 港湾管理者が運用するため

の簡易な高潮リアルタイム予測システムを開発し、港湾管理者の水防活動の一助とすることを目的としている。また、港湾管理者の実際の運用面を考慮して、2 日間の高潮計算を 10 分程度で予測できることを目標とした。

2. 簡易高潮リアルタイム予測システム

(1) 高潮計算モデル

本システムでは、高潮予測計算として、数値計算モデルを解く方法を採用しており、台風モデルによって気圧場、風場を算出し、非線形長波理論に基づいた流れの連続式や運動方程式を解く数値計算モデルを用いている。台風モデルには、以下に示す藤田の式を用いた。

$$P = P_{\infty} - \frac{\Delta P}{\sqrt{1 + (r/r_0)^2}} \quad (1)$$

ここに、 P ：距離 r の地点での気圧、 P_{∞} ： $r = \infty$ の地点での気圧、 r ：台風中心からの距離、 r_0 ：最大風速半径、 ΔP ：気圧深度（ $= P_{\infty} - P_C$ ； P_C は台風中心気圧）である。

計算領域については、計算時間短縮のために、格子間隔を大きくとり、図-1 に示すように、東南海沖を格子間隔 2.7km の大領域で、計算対象である瀬

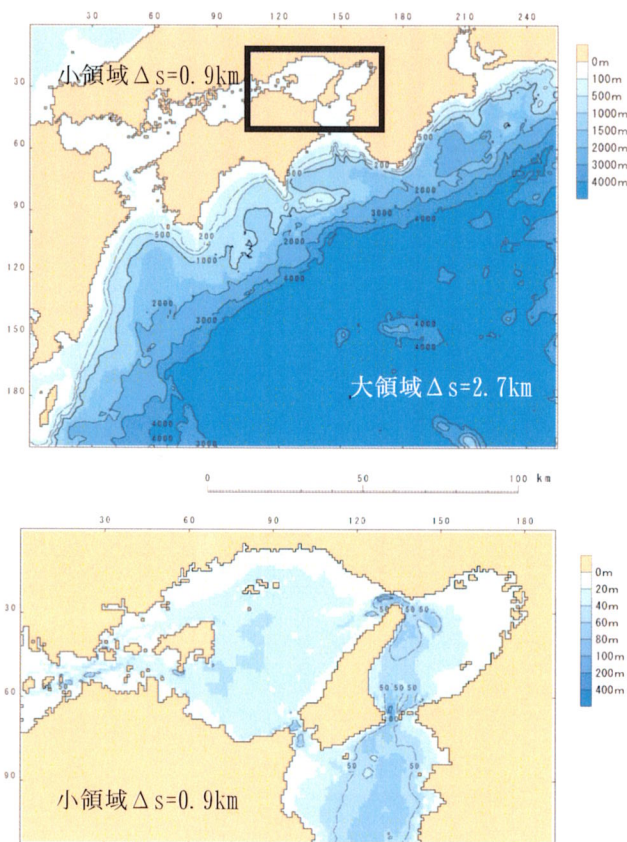


図-1 計算領域（大領域と小領域）

表-1 計算条件

領 域	大領域	小領域
項 目		
計算格子間隔	$\Delta s=2.7\text{km}$	$\Delta s=0.9\text{km}$
計算範囲	南海沖	瀬戸内海東部・大阪湾
計算時間間隔	6.0 秒（安定条件より）	
基礎方程式	非線形長波式	
気圧・風の計算	藤田の気圧分布式による気圧、傾度風と場の風の合成風速を用いる	
海底摩擦	考慮しない	マニングの粗度係数 $n=0.03$
沖側境界条件	気圧による	-
水位上昇で制御	外側の大格子領域と水位・流量を接続	
陸側境界条件	完全反射（汀線に直角な流量成分を 0 とする）	
初期条件	潮位：平均海面相当	

戸内海東部と大阪湾を格子間隔 0.9km の小領域で設定した。

また、時系列計算結果については、播磨灘沿岸および淡路沿岸の 11 港湾（尼崎、西宮、明石、東二見、高砂、姫路、相生、洲本、由良、福良、江井）を対象とし、計算結果の検証のために、それぞれの検潮所位置を出力地点とした。

その他、計算に用いた計算条件については、表-1 に示す通りである。

(2) システムフロー

以下に、本研究で構築した高潮リアルタイム予測システムの手順を述べ、システムのフローを図-2 に示す。

a) 推算天文潮位の登録

台風期を迎える前に、あらかじめ推算された予測天文潮位を本システムに登録する。天文潮位は、60 分潮の調和定数から算出したものを用いており、毎年、推算された天文潮位を登録する。

b) 計算条件（台風諸元）の入力

台風が発生し、兵庫県沿岸に接近することが予想されると、既に観測された実績の台風諸元（台風の緯度、経度、中心気圧）と気象庁が発する台風進路予測情報（予測時刻から 12、24、48 時間後などの台風諸元）を図-3 に示す入力画面に入力する。

また、入力画面には、風の低減率：C1、C2、吹き込み角：AG、1000hPa 等圧線半径などを入力するように設定している。C1、C2 および AG については、 $C1=0.7$ 、 $C2=0.7$ および $AG=30^\circ$ を既定値とし、計算ケースによって変更できるようにしている。

台風半径については、通常の高潮推算などでは、複数の気象観測値から台風半径を推定する方法が用いられる。しかし、高潮リアルタイム予測では、気象観測値を用いることができないため、予測時刻の最新の天気図を用いて、台風中心から1000hPaの等圧線までの半径を読みとり、その値から台風半径を推定することとした。また、本システムでは、簡便のため、台風来襲期間において、台風半径は変化しないものと設定している。

台風コースについては、台風進路予報円の中心コースを基本として、予報円の半径から、予報円の東より（西より）コースと最も遅い（速い）コースの合計5コースを設定できるようにしている。

c) 高潮計算の実施

b)で入力した台風諸元を用いて、台風モデルによって気圧・風場を計算し、数値計算モデルによって、高潮計算を実施する。その際、各出力地点での高潮偏差の時系列データおよび最大値を記録しておく。

d) 最高潮位の算出

c)によって算出された高潮偏差を a)で登録した天文潮位に加えて、台風来襲に際した最高潮位、とその生起時刻を推定する。算出された時系列予測結果について、図-4に示すようにグラフで表示するよう設定している。図-4は、上から計算偏差、天文潮位、予測潮位（偏差+天文潮位）の時系列データである。図に示すように、予報円中心、最も西より、最も東より、最も遅い、最も速いケースを一度に表示できるようにして、対象地点では、どのコースの場合に、何時ころ、最高潮位になるかを把握できるようにしている。

また、最大偏差の平面分布図についても、図-5に示すように表示できるようにしている。

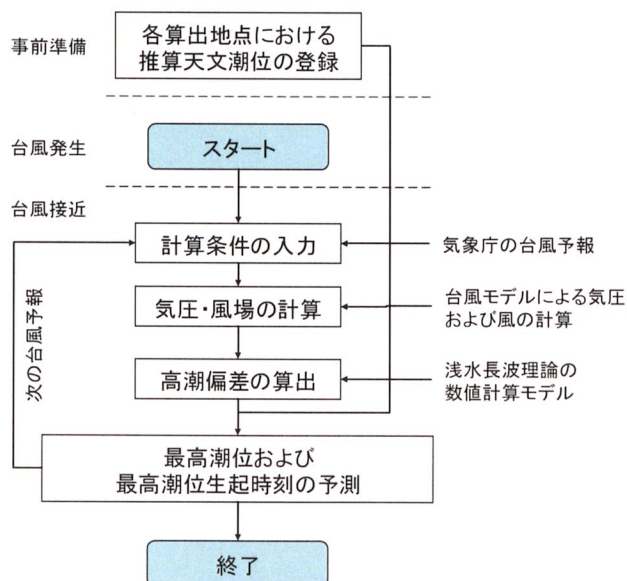


図-2 システムのフロー

計算ケース登録

ケース名: 半角英数字で10文字以内

コメント: 予報円中心

C1: 0.70 傾度風係数 (default=0.7)

C2: 0.70 風の場係数 (default=0.7)

P1: 10130 遠方の気圧 (default=1013hPa)

PA: 1000.0 半径を読み取った気圧 (default=1000hPa)

AG: 30.0 風の吹き込み角 (default=30°)

RA: 300.0 PA(hPa)の等圧線半径 (default=300.0km 定数とする)

台風諸元

Date	Time	PC	Tx	Ty
年	月	日	時	

追加 修正 クリア 削除

予想進路の追加

から最終日時までの予報円半径 km

読込 上書き保存 別名保存 キャンセル

図-3 計算条件入力画面

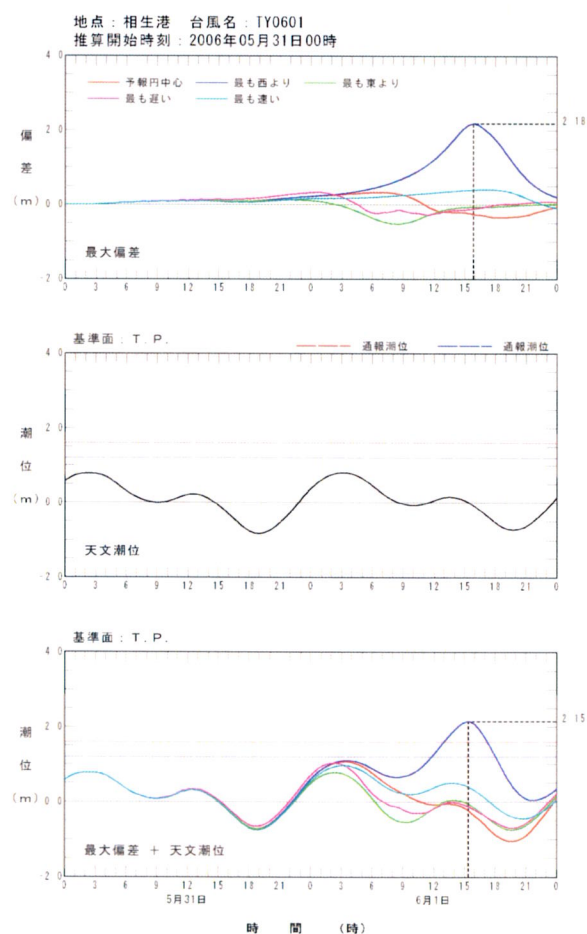


図-4 時系列計算結果出力例

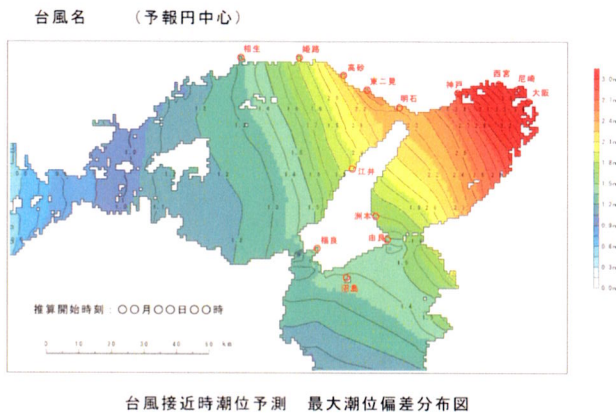


図-5 最大偏差出力例

e) 台風情報の更新

新たな台風進路情報が発表されたら、b)～d)を繰返し、最新の情報を用いて、最高潮位やその生起時刻について、より正確なリアルタイム予測を実施する。

b)～d)の高潮計算で1回に要する計算時間を概ね、10分程度(2日間の高潮計算、通常の普及型パソコン)としている。

3. 高潮数値計算モデルの精度検証

本システムの数値計算モデルの精度を検証するために、対象地域に大きな高潮偏差をもたらした台風0416号および台風0418号、台風0423号を対象として、本システムに実際の観測台風諸元を入力し、高潮追算を行った。計算に用いた計算条件は表-2に示す通りである。計算対象範囲に影響を及ぼすと考えられる期間を含むように設定しており、計算期間内の台風位置情報は、概ね3時間後の観測値を入力している。

3台風とも、風の低減率C1, C2については0.7、風の吹き込み角は30°を用いている。1000hPa等圧線半径については、対象区域に最接近した時の天気図から読みとった値を用いている。

図-6～図-8に、兵庫県内の9検潮所(尼崎、明石、東二見、高砂、姫路、相生、由良、福良、江井)における、台風0416号、台風0418号および台風0423号来襲時の計算結果を示す。それぞれの図は、各台風来襲にともなう最高潮位と最大偏差の観測値と計算値の比を示している。図-6の由良港や福良港のように、最高潮位では、概ね一致しているが、最大偏差で観測値との誤差が大きくなっている点については、観測値と計算値で用いている推算天文潮位が異なり、また、最大値の生起時刻が異なる場合があるなどが考えられる。

図-6～図-8から、計算した3台風による計算結果において、各検潮所を平均すると数%程度の誤差

表-2 計算条件

	T0416	T0418	T0423
計算開始時刻	2004/8/29 9時	2004/9/7 0時	2004/10/20 0時
計算終了時刻	2004/8/31 12時	2004/9/8 9時	2004/10/21 21時
C1	0.7		
C2	0.7		
風の吹き込み角	30°		
1000hPa 等圧線半径	500km	500km	500km

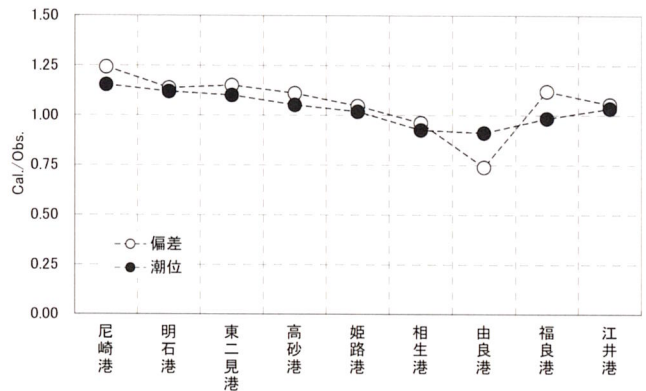


図-6 高潮計算結果(台風0416号追算)

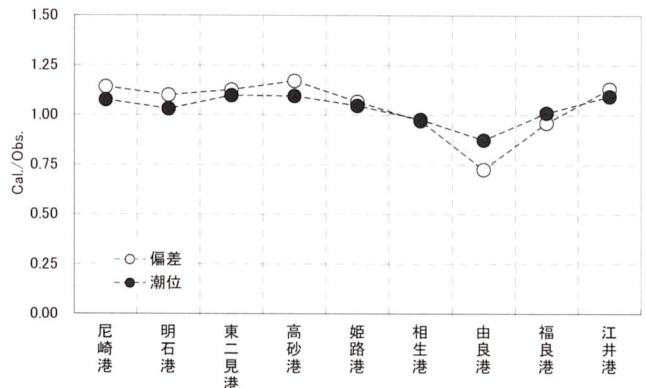


図-7 高潮計算結果(台風0418号追算)

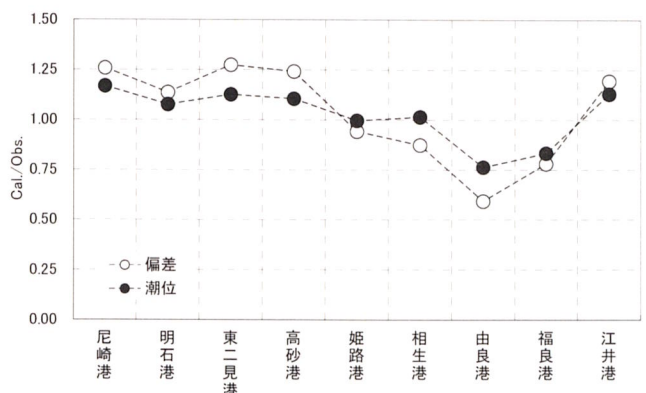


図-8 高潮計算結果(台風0423号追算)

であり、予測計算としては、十分な精度であると言えます、本数値計算モデルの有用性を確認することができた。しかし、実際の運用にあたっては、播磨灘沿岸および大阪湾の検潮所において、計算偏差は過大評価する傾向にあり、淡路沿岸（特に由良港）では、計算偏差は過小評価する傾向にあることを認識して運用する必要がある。

4. 高潮リアルタイム予測の試行

本システムの検証として、兵庫県沿岸への接近が予想された台風 0613 号について、高潮リアルタイム予測を試行した。

台風 0613 号は、図-9 に示すように、2006 年 9 月 10 日 21 時にフィリピンの東海上で発生し、発達しながら北西に進み、勢力を維持したまま、沖縄本島の西海上を北東に進んだ。その後、17 日には、中心付近の最大風速が 40m/s と強い勢力で九州地方に接近し、同 18 時過ぎに長崎県佐世保市付近に上陸した後、九州北部を北東進し、20 時頃日本海へと進んだ。

九州上陸後の 2006 年 9 月 17 日 19 時から高潮リアルタイム予測を行った。9 月 17 日 19 時に気象庁によって出された台風進路予報図を図-10 に示し、台風諸元を表-3 に示す。網掛けをしている時刻の諸元が実績の観測値であり、その他の時刻の諸元が予報値である。

表-3 の計算条件で、予測計算を実施した結果を図-11 に示す。図から予報円中心コースでの姫路港の予測最大偏差は、18 日 4～5 時に 0.91m であった。台風 0613 号は、ほぼ予報円の中心を進行したが、姫路港での実測最大偏差は、18 日 3 時過ぎに 0.85m を記録しており、本システムが最大偏差やその生起時刻を正確に予測できることがわかった。

また、姫路港における台風 0613 号来襲にともなう最も危険なコースは、予報円の最も東よりコースであり、予報円中心コースよりも 2～3 時間遅れて最大偏差が発生することがわかる。

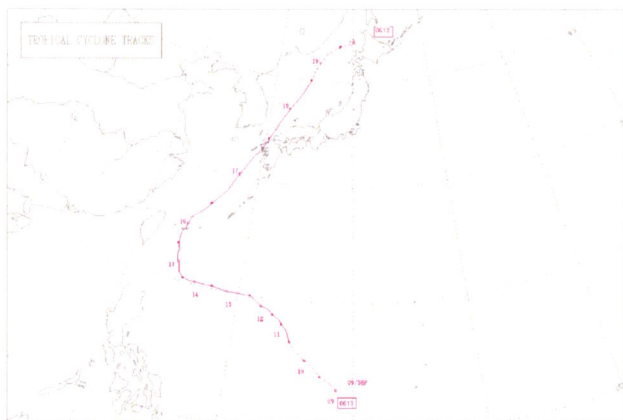


図-9 台風 0613 号経路図 (気象庁⁴⁾)

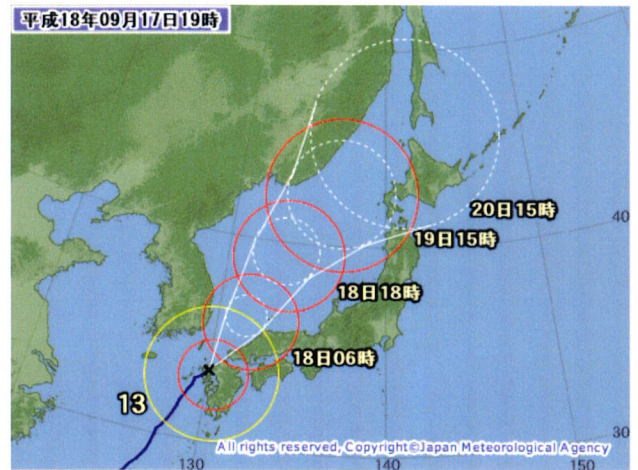


図-10 台風 0613 号進路予想図
(気象庁⁴⁾, 2006 年 9 月 17 日 19 時)

表-3 予測計算に用いた諸元

時刻	中心気圧 (hPa)	北緯 (°)	東経 (°)
9/16 15時	925	26.0	124.8
9/17 00時	925	27.8	126.4
9/17 09時	940	30.3	128.0
9/17 15時	950	32.2	129.0
9/17 18時	950	32.9	129.6
9/17 19時	950	33.1	129.8
9/18 06時	955	36.0	131.6
9/18 18時	970	39.3	133.5
9/19 15時	975	42.4	136.9

*網掛けは実測値

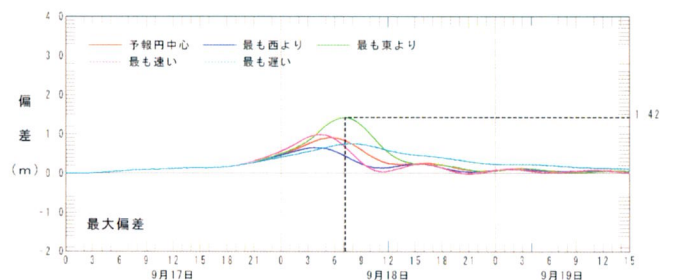


図-11 姫路での予測偏差 (台風 0613 号)

5. おわりに

本研究で得られた主要な知見を以下にまとめる。

1. 兵庫県沿岸（特に、播磨灘沿岸および淡路沿岸）を対象として、港湾管理者の水防活動の一助とするために、簡易高潮リアルタイム予測システムを開発した。
2. 台風 0416 号と台風 0418 号、台風 0423 号来襲

時の再現計算によって、高潮計算システムの精度を検証し、本システムの有用性がわかった。

3. 台風 0613 号来襲時に高潮リアルタイム予測を実施し、姫路港にて高潮偏差およびその生起時刻を正確に推定し、その実用性が確認できた。

また、高潮計算で使用する気圧や風速からパラメータ法による簡易な波浪推算を行い、波浪予測を本高潮予測システムに加えることで、避難や水防活動の警戒基準を予測越波流量によって判断できるシステムについても、併せて開発している。

兵庫県には、日本海側にも海岸線があり、日本海側の港湾についても、同様の簡易高潮リアルタイム予測システムを作成する予定である。しかし、熊谷ほか⁵⁾は、円山川河口に位置する津居山港について、地理的条件が他の港湾と異なり、円山川の洪水流量の影響を大きく受けることを指摘している。このため、台風来襲時の津居山港での水位を予測する際には、洪水流による円山川の水位の情報を取り入れる必要があり、リアルタイム予測システムの実施方法については、検討を要する。

参考文献

- 1) 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，港空研資料，No. 1085，25p，2004.
- 2) 額田恭史，山本忠治，福山博己：第三世代ナウファスに対応した NEW カムインズの構築，沿岸センター研究論文集，財団法人沿岸開発技術センター，No. 3，pp. 73-76，2003.
- 3) 中平順一，吉田武司，高山知司，間瀬 肇：高潮・高波の簡易予測システムの構築とその運用，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 201-205，2003.
- 4) 気象庁：<http://www.jma.go.jp/>
- 5) 熊谷健蔵，市瀬友啓，平井住夫，辻尾大樹：台風 0423 号による円山川河口部に位置する津居山港周辺の浸水原因について，海岸工学論文集，第 53 巻，pp. 201-205，2006.