

有明海における台風時の高潮・波浪・打上げ・ 越波リアルタイム予測システムに関する研究

STUDY OF A REAL-TIME FORECAST SYSTEM FOR STORM SURGE, WAVES,
RUNUP AND OVERTOPPING DISCHARGE IN ARIAKE SEA

中平順一¹・間瀬 肇²
Junichi NAKAHIRA and Hajime MASE

¹正会員 八千代エンジニアリング株式会社 (〒161-8575 東京都新宿区西落合2丁目18-12)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

A real-time forecast system for storm surges and waves in Ariake Sea is developed to include wave runups and overtopping discharges as more appropriate warning system for the residents. This real-time warning system consists of simplified and suitable tuned theoretical and empirical prediction models. In the system, runup predictions are carried out the Savile's method of which validity was checked by employing the numerical model called as the CADMAS-SURF for cases applies to the target condition in the Ariake Sea area. By using this system, administrators can make decisions evacuation in advance. However, it is still necessary to develop more sophisticated and valuable information as the warning system.

Key Words : storm surges, storm wave, real-time prediction, typhoon disaster, wave run-up, wave overtopping

1. はじめに

高潮被害は、海岸保全施設の本格的な整備が始まる昭和30年代以前に、特に甚大な被害が生じていた。その後、高潮対策事業の推進により高潮による被害は徐々に減少しつつあるものの、人的被害の回避は実現していない。こうした高潮による被害は、海岸施設の天端高不足や耐力の不足などにより生じているとは限らず、過去の実績に基づく海岸施設の整備に対し、想定外の外力が作用したことが要因であると考えられている。

近年では、台風の接近に伴いリアルタイムで内湾の高潮・高波の予測を行うシステムが提案されており、1時間から数時間程度の計算時間で精度の高い予測を行う加藤ら¹⁾の波浪予測システムや、河合・富田²⁾の高潮予測システム、辻尾ら³⁾の兵庫県沿岸を対象とした高潮の簡易予測システム等がある。

本研究は、潮位の干満差が大きく沿岸に干潟が広く分布する有明海を対象として、中平ら⁴⁾の高潮・高波の簡易予測システムを更に防災行動へ寄与できるようにするため、沿岸堤防への打上や越波流量等の防災情報を得る総合的な予測システムの構築を目的とする。

有明海は図-1 に示すように水深が浅く、沿岸部は干潟が広がる特異な海域であることから、海域特

性を十分に考慮したシステム構築を目指す必要がある。気象庁予報をもとに実施する高潮・高波の簡易予測システムでは、潮位と波高の予測値は台風予報情報による誤差を含む。

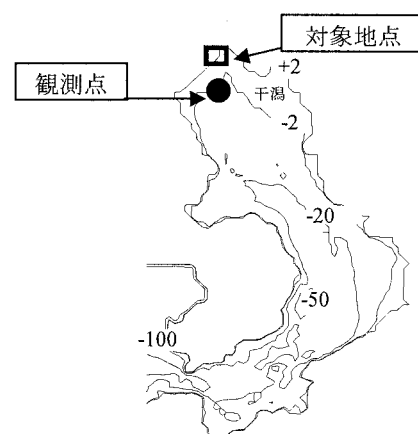


図-1 対象海域 (有明海)

予測情報を沿岸域の水防活動に活用するためには、打上高や越波等の地域に密着する具体的なイメージに置き換えて情報提供を行うことが望ましい。そこで、本研究は即時性を重視した打上高予測モデルと越波予測モデルを組み入れた簡易的なリアルタイム予測システムを構築する。

2. 高潮・波浪リアルタイム予測システム

有明海を対象海域とした高潮・高波簡易予測システムは、その海域特性を踏まえて構成要素モデルを選択し、以下のように構築されている。

(1) 予測システム

台風予報円のみによる予測計算は入力する台風コースによる誤差が大きく影響することを鑑み、本予測システムは、数ケースを台風接近中に予測計算する。システム開発に当たっては、予測の所要時間を開発当初の目標として10分程度としていたが、現在ではパソコンの高速化により数分程度(Pentium4, 2GHz)に短縮が可能となった。

表-1に各予測項目に対して採用する要素モデルを整理した。予測項目のうち、主たる高潮と高波のモデル構築にあたって、時間短縮のため、①高潮予測モデルでは、有限要素法により沿岸部のみ詳細なマトリックスとする、②極浅海域波浪推算モデルSWANでは、非線形相互干渉を省略した予測モデルを構築した。

表-1 高潮・高波簡易予測システムの構成

サブシステム	予測項目	要素モデル
天文潮位計算	天文潮位	27分潮重合せ推算式
海上風予測	気圧・海上風	Myers
高潮予測	気象潮位	平面2次元FEM
河川遡上	高潮河川遡上	1次元基礎方程式
波浪予測	波浪	SWAN

(2) システム運用

各要素モデルの相互関係を図-2に示す。リアルタイムで予測を行うための入力条件は時間と台風情報のみであり、図-3に示す画面より情報入力を行い、地点別の潮位、波高を表示する。入力および出力は、台風コースの1経路毎に実施する。

構築したシステムによる予測結果の精度は、入力する台風情報により左右されるが、過去の台風経路に基づく検証計算⁹⁾では、概ね潮位で±30cm、波高で±50cm程度であった。特に波高の精度については海上風の予測精度にも依存しており、実測風による検証計算では±30cmまで精度が上がる結果であった。

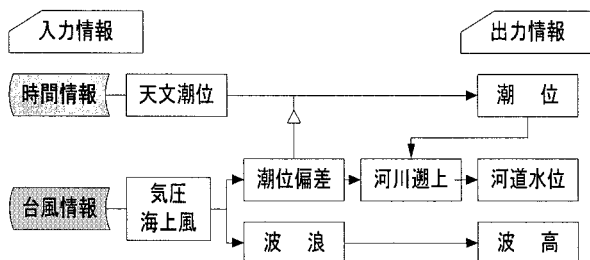


図-2 高潮・高波簡易予測システムフロー

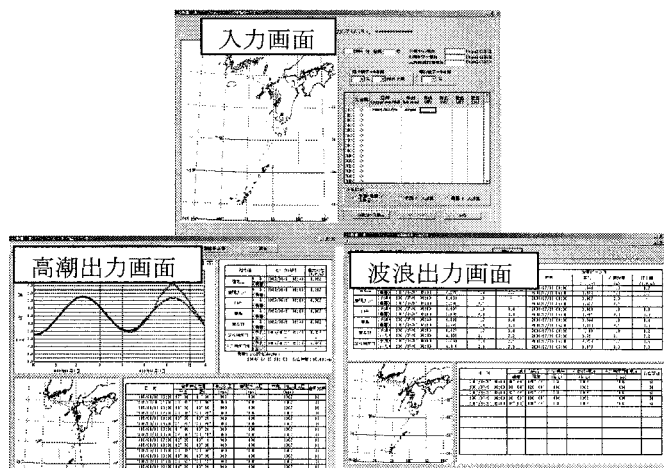


図-3 システム入力画面と出力画面

3. 打上高予測システム

(1) 打上高の算定手法

海岸堤防への波の打上高の算定には、堤防の断面形状や波形勾配などの条件により、いくつかの手法が海岸施設の設計便覧⁹⁾や設計基準⁹⁾等に示されている。対象海域の特に湾奥沿岸部は、表-2に示すように、干潟に高天端の堤防が建設されている。海岸施設の設計では、中村ら⁷⁾による改良仮想勾配法が用いられている。しかし、対象構造物は図-4に示すような直立に近く、仮想勾配 $\cot \alpha$ が2以下になるケースがほとんどで、改良仮想勾配法の適用外($\cot \alpha = 2 \sim 50$)である。

表-2 有明海湾奥部の堤防諸元

堤防諸元	湾奥の平均的な値
計画天端高	T.P.+7.4m(計画)
堤防前面勾配(y/x)	1/0.5
堤脚水深(根固天端)	T.P.±0.0m
海底勾配	1/100 以下

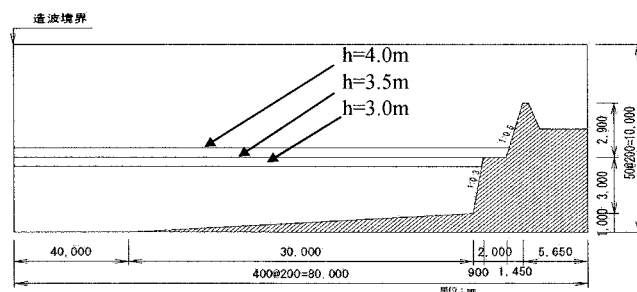


図-4 CADMAS-SURF 計算モデル(単位:mm)

直立に近い堤防の打上高の簡易的な算定手法としては、一様断面を対象とした豊島⁸⁾の算定図と仮想勾配 $\cot \alpha$ が0.5まで適用可能なSaville⁹⁾の仮想勾配法がある。

(2) 打上高予測モデルの検討

打上高の検証は、現地観測データの入手が困難であることから、CADMAS-SURF¹⁰⁾を用いた数値実験として図-1に示す対象地点の現地堤防断面を再現し、規則波の打上高の計算結果と、仮想勾配法による打上高および豊島らによる打上高とを比較し、豊島の算定図と仮想勾配法による算定結果の比較を行った。

図-4は、現地の標準堤防断面を現地スケールで示したものである。断面のモデル化に際し斜面が階段状になる影響を抑えるため、 $\Delta x = \Delta y = 20\text{cm}$ とした。打上高は斜面上に50cmピッチで水位を時系列で計測し、その平均値を打上高とした。

計算条件は、図-5に示す、湾奥における台風時の波浪観測データ(有明タワー総合)をもとに、台風時の波浪特性として、波高1.0m, 1.5m, 2.0mおよびそれらに対応する周期(図の矢印)とした。また、水深は3.0m, 3.5mおよび4.0m(既往最高潮位)の3ケースとし、全ての計算条件を表-3に示す。

表-3 計算条件

Run	h(m)	H(m)	T(s)	L(m)	H/L
1	3.0	1.0	3.5	19.1	0.052
2		1.5	4.0	25.0	0.060
3		2.0	5.0	39.0	0.051
4	3.5	1.0	3.5	19.1	0.052
5		1.5	4.0	25.0	0.060
6		2.0	5.0	39.0	0.051
7	4.0	1.0	3.5	19.1	0.052
8		1.5	4.0	25.0	0.060
9		2.0	5.0	39.0	0.051

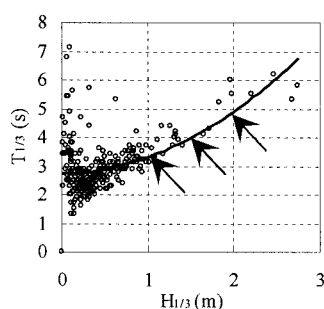


図-5 台風期の波浪観測値(1991-2000)

取り上げた計算条件では、仮想勾配は $\cot \alpha = 0.5 \sim 1.0$ となる。CADMAS-SURF による打上高は、図-6の計算結果に見られるように、最初の数波は斜面上への打上りが小さいため、打上高が安定したと見られる5波目以降の5波～10波の平均値を採用した。

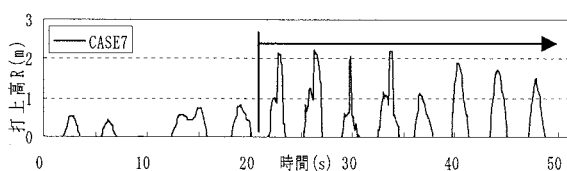
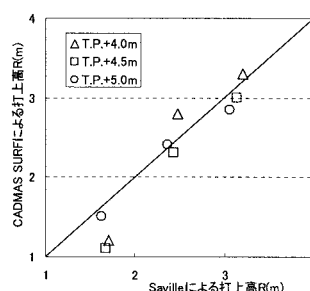


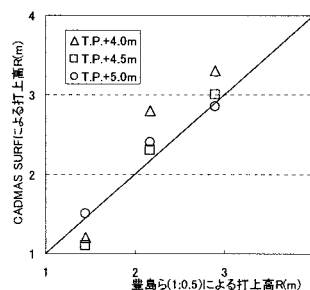
図-6 CADMAS-SURF による打上高(Run-7)

図-7が相互の打上高を比べたものである。今回計算を行った断面は、水面付近に堤防の小段があり、CADMAS-SURFでは進行波がこの小段で反射し複雑な水位変動が発生し(図-8参照)、打上高がばらつく結果となった。図-7(a)の仮想勾配法による打上高との比較では、潮位が高い場合には堤防小段の影響が小さくなり簡易法の打上高に比較的近い結果となった。

仮想勾配法が複雑な断面から仮想勾配を設定し打上高を求めるのに対し、豊島らの算定図による打上高は、あくまで一様斜面を対象としていることから、水位の低い条件(図-7(b)の△印)ではCADMAS-SURFの結果との差が大きくなる。



(a) 仮想勾配法との比較



(b) 豊島らの算定図との比較

図-7 簡易法とCADMAS-SURFによる打上高の比較



図-8 小段による反射(CADMAS-SURF)

以上、本条件では仮想勾配法による打上高予測モデルの構築が適していることがわかった。

(3) 打上高予測システムの構築

本システムにおける打上高予測システムは、地点別に断面条件を入力し、高潮・高波簡易予測システムで予測した潮位および波浪の条件をもとに打上高を標高で出力する。システム内の打上高の計算は、現地の波浪条件、断面形状に基づき表-4の条件により線形近似による簡易式を導きその計算式をもとに打上高を算定する方法でシステムを構築した。

打上高予測システムでは、図-9のフローにより計算を行うが、全て簡易式と線形補間とすることか

ら計算に時間は要さない。また、出力画面は図-3に示す波浪予測結果の画面に波高と合わせて最大値を出力する。

表-4 予測システムの条件設定値

予測結果	設定値
波高(m)	0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,3.5
周期(s)	3,4,5,6,7
cot α	0.5,0.75,1.0

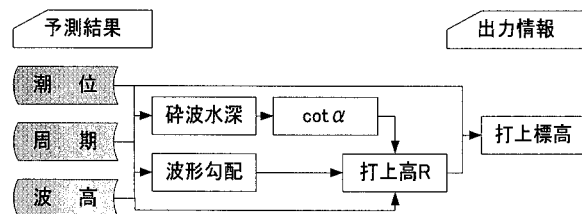


図-9 打上高予測システムのフロー

4. 越波と浸水予測

(1) 越波予測の必要性

本システムは、当初、打上高予測結果までを対象としてシステム構築を行った。しかし、沿岸防災においては越波・越流による浸水域の予測ができれば、システムを避難誘導等に活用することができる。

波による越波流量および水位上昇による越流量の推定は、海岸保全計画等において、以下の算定式を基本としている。

- ・越波流量算定式：合田の越波流量算定図
- ・越流量算定式：本間の式

ただし、本間の式は波浪を考慮できないことから、水位が堤防天端高付近となる越波から越流に変わる境界で流量が急激に小さくなる問題がある。合田の越波流量算定図¹¹⁾は水面上の天端高波高比 h_c/H_0' の範囲が0.5~2.0となっており、この条件に満たない場合には外挿するケースもあるが、得られる値の信頼性は低くなる。

本研究で検討する堤防断面は、天端高+7.40m に対し既往最高潮位が+5.00m であり、越流の可能性は極めて小さい。さらに、越波流量の計算において $h_c/H_0' < 0.5$ となる可能性は極めて小さい。したがって、簡易的な手法による越波流量の予測は、本システムにおいて適用可能であると判断した。

(2) 越波流量予測

越波流量も、表-3 に示した条件で算出する。合田の算定図によって求めた越波流量を表-5 に示す。

越波流量は波浪ピーク時の流量と総流量を出力する方法が考えられるが、波浪ピーク時の流量の評価としては背後地利用状況を踏まえた福田ら¹²⁾による許容越波流量を用いることができる。この許容越波流量をもとに、表-5 で算定された越波流量が、背後地ではどの程度危険であるかを判断するための目安にすることができる。

表-5 越波流量算定結果（合田¹¹⁾の算定図）

Run	H(m)	h(m)	hc(m)	h/H	hc/H	q(m ³ /m/s)
1	1.0	3.0	3.5	3.00	3.50	-
2	1.5	3.0	3.5	2.00	2.33	4.1E-04
3	2.0	3.0	3.5	1.50	1.75	2.5E-03
4	1.0	3.5	3.0	3.50	3.00	-
5	1.5	3.5	3.0	2.33	2.00	9.8E-04
6	2.0	3.5	3.0	1.75	1.50	7.5E-03
7	1.0	4.0	2.5	4.00	2.50	6.6E-06
8	1.5	4.0	2.5	2.67	1.67	1.6E-03
9	2.0	4.0	2.5	2.00	1.25	1.5E-02

福田らの許容越波流量は、越波観測ビデオを見た人が安全と判断する割合で評価している。本研究では、表-6 に示すように、50%安全度よりも越波流量が多い場合を危険度が大、90%安全度よりも越波流量が少ない場合を危険度が小とした。

この評価方法では、水深 4.0m の既往最高潮位に近い潮位条件では、波高が 1.5m 以上の条件で危険度が大となる。

表-6 越波流量による危険度

越波流量 (m ³ /m/s)	利用 者			危険度
	歩行者	自動車	家屋	
1×10^{-2}	50%安全度以上の越波			大
1×10^{-3}				
1×10^{-4}				中
1×10^{-5}				
1×10^{-6}	90%安全度以下の越波			小
1×10^{-7}				

(3) 浸水予測手法

総流量を防災情報として利用するため、簡易予測手法による浸水予測の手法について検討するとともに、浸水予測結果の提供イメージを示す。

ハザードマップの作成マニュアル¹³⁾等で示されている浸水域の予測手法ならびに特徴について、表-7 に概要を整理する。

表-7 代表的な浸水予測手法

手 法	特 徴	適 正
シミュレーション	海域から陸域まで非線形長波モデルで計算	地形の影響を反映するため信頼性が高い
	堤防より平面2次元不定流モデルで計算	陸・海は別計算であるが信頼性が高い
レベル湛水法	流入量により浸水位全て同一とする	閉鎖的な浸水域に摘要可能で、簡易手法として実績が多い
既往浸水実績	実績に基づく浸水域の設定	現況施設での浸水実績の情報がある場合に摘要可能である
地盤高	高潮潮位と浸水位が等しいとする	堤防未整備や堤防高が高潮潮位より低い場合に摘要可能である

表-7 に示すシミュレーションの精度は、格子サイズに依存するが、計算に数時間～数日を要する。

本研究では、簡易性を重視するとともに、堤防高が既往最高潮位より 2m 以上高いことから、浸水予測手法はレベル湛水法を採用した。

(3) レベル湛水法による浸水予測イメージ

合田の越波流量算定図をもとに越波流量を求め、レベル湛水法で浸水域を予測する。

本研究の対象海域である有明海灣奥では、堤防の背後地には干拓地が広がっている。干拓地は、標高が低く地形の起伏が小さいことからレベル湛水法では浸水域の変化が分かり難いので、リアルタイム予測システムでは対象地域の浸水範囲の評価は行わない。ここでは、評価の具体例を示すために、図-10 に示すモデル地形を対象としてテスト計算を実施した。格子間隔は国土地理院の数値地図で電子データが容易に入手可能である 50m 間隔で作成した。

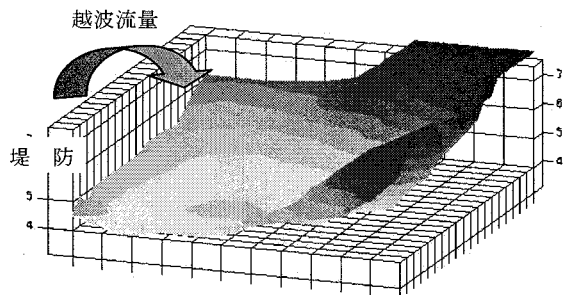


図-10 浸水予測モデル

レベル湛水法はハザードマップ作成や海岸施設の費用対効果分析などで広く活用されている簡易的な手法であり、浸水域における各格子の地盤高のうち最低地盤高から水位を上昇させたときの水位 H_1 に対する湛水量 V を求めて浸水域全体の浸水位を算定する方法である。算定式は、以下の様である。

$$V = \sum v_{i,j}$$

$$v_{i,j} = (H_1 - G_{i,j}) \Delta S$$

$$H_1 = H_i + \Delta H_i$$

ここで、 $v_{i,j}$ は各格子の水位 H_1 に対応した湛水量であり、 $G_{i,j}$ は格子地盤高、 ΔS は総面積である。

浸水深は越波流量がそのまま湛水するため、 H - V 曲線により湛水量に対する水位 H_1 を設定し、水位 H_1 から地盤高 G を差し引いた値が浸水深となる。

予測計算は、表-5 の越波流量算定結果のうち、最大値の Run-9 の条件で実施した。今回は越波の継続時間を 6 時間とし、潮位偏差の実績から、数時間程度は高潮が継続することから、既往最大の 2.3m のピークが継続するものと仮定した。計算に用いた潮位条件を図-11 に示す。また、高波も 6 時間継続すると仮定し、波高 2m で条件を固定して、1 時間毎の総流量をもとに浸水域を予測した。図-12 は Run-9 の条件による浸水域および浸水深の 2 時間毎の出力である。

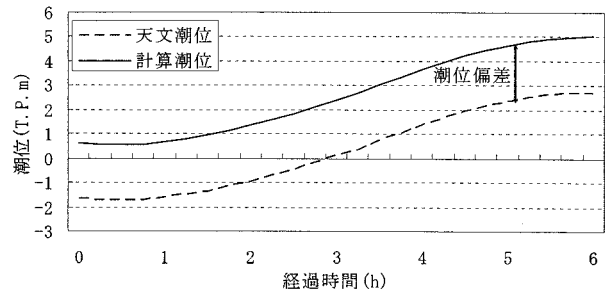


図-11 潮位条件

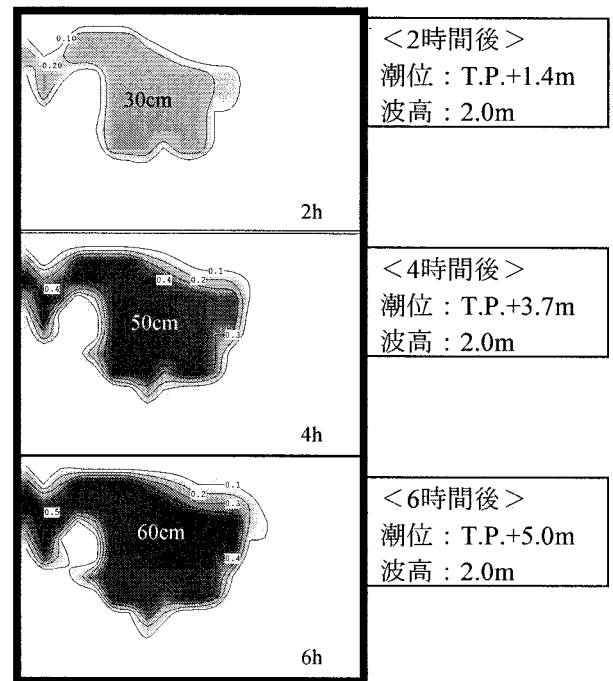


図-12 浸水深・浸水域の変化

市町村などで作成されているハザードマップが想定最大の浸水域を示しているのに対し、図-12 は、想定最大以下の台風による浸水域の広がりや浸水深の変化を表現している。これは、ハザードマップと接近中の台風との補完的な情報として活用が可能である。また、実地形を対象とした検討では、利便性を考えて、ハザードマップのように背景に地図等を加えることが望ましい。

今回構築したシステムは、予測波高の出力を最大値のみとしているため、今回の予測計算は波浪条件および潮位偏差についても条件を固定して予測を実施した。今後は、システムを改良して時系列の波高を越波および浸水予測に反映する方向で検討を進めていく方針である。

レベル湛水法は、対象となる浸水地域が広く、侵入した海水が拡散する地形での予測精度は期待できない。こうした地形ではハザードマップでもレベル湛水法を適用していない可能性が高い。浸水域予測システムを現地に適用するためには、予測精度の検証とともに、ハザードマップの計算条件をもとに地

形条件に対応した適切な手法の選定も必要となる。

4. おわりに

本研究は、有明海の海域特性を踏まえた既存の高潮・高波の簡易予測システムを元にして、沿岸堤防への打上や越波流量等の防災情報を得る総合的な予測システムの構築を行った。

打上高予測システムでは、仮想勾配法をもとに簡易式と線形補間で予測を行い、出力は波浪予測結果の画面に波高と合わせて打上高の最大値を出力することとした。越波流量の予測システムでは、合田の越波流量算定図によりピーク時の越波流量を計算し、福田らの許容越波流量を参考に危険度による出力を提案した。拡張した各予測システムは、簡易法を用いることにより計算時間を必要としないため、台風接近中の予測作業に負荷がかからないシステムを構築することができた。浸水予測については、モデル地形によるイメージのみを検討したが、今後は対象地域を具体的に設定し、レベル湛水法の適用性を含めて検討する必要がある。

利用している算定式に依存し、打上高が堤防天端を超えない場合であっても越波による浸水は発生すると予測される事がある。本システムの運用に関しては、打上高では越流の危険度を評価することとする。また、越波流量をもとにした浸水域予測では、最も危険な浸水域を表すハザードマップと接近中の台風との補間的な情報として活用が可能である。今後はシステムの精度検証を十分にを行い、信頼性を高めるための改良を進めていく方針である。

参考文献

1)加藤史訓・福濱方哉・橋本典明・三嶋宣明・松藤絵理子・宇

都宮好博:内湾を対象としたリアルタイム波浪予測システムの開発,海洋開発論文集,第23巻,pp.225-230,2007.

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,第23巻,pp.123-128,2007.

4)中平順一・吉田武司・高山司知・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.

5)土木学会:海岸施設設計便覧 2000 年版,2000.

6)海岸保全施設技術研究会編:海岸保全施設の技術上の基準・同解説,2004.

7)中村 充・佐々木康雄・山田譲二:複合断面における波の打ち上げに関する研究,第9回海岸工学講演会講演集,pp.309-312,1972.

8)豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏:海岸堤防への波のうちあげ高-1/30-,第11回海岸工学講演会論文集,pp.260-265,1964.

9)Saville,T.,jr.:Wave run-up on composite slopes,Proc.6th Coastal Engg.Conf.,ASCE,pp.691-699,1958.

10)財団法人 沿岸技術研究センター:数値波動水路の研究・開発,沿岸開発技術ライブラリー No.12,2001.

11)合田良実・岸良安治・榊山 豊:不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究,港湾技術研究所報告 Vol.14 No.4,pp.3-44,1975.

12)福田伸夫・宇野俊康・入江 功:防波護岸の越波に関する現地観測(第2報),第20回海岸工学講演会論集, pp.113-118, 1973.

13)財団法人 沿岸技術研究センター:津波・高潮ハザードマップマニュアル,2004.