

洪水時における避難情報の提供や事業効果の 提示を支援する浸水表示システムの構築

DEVELOPMENT OF INUNDATION MAPPING SYSTEM FOR PROVIDING EVACUATION INFORMATION FOR FLOODS AND PRESENTING THE EFFECTS OF FLOOD COUNTERMEASURES

福井治¹・由良英作¹・深草新¹・辻倉裕喜²・山地秀幸³

Osamu FUKUI, Eisaku YURA, Shin FUKAKUSA, Hiroki TSUJIKURA and Hideyuki YAMAJI

¹正会員 工修 (株) 建設技術研究所 大阪本社 水システム部 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

²正会員 工博 (株) 建設技術研究所 中部支社 河川部 (〒460-0003 名古屋市中区錦1-5-13)

³正会員 国土交通省 四国地方整備局 高知河川国道事務所 調査課 (〒780-8023 高知市六泉寺町96-7)

The inundation display system with multiple functions was constructed for the purpose of supporting the realization of quick and accurate information in the flood and the presentation of clear effect of flood prevention project. The system estimates current and future inundation conditions and calculates effect of flood prevention project.

In constructing this system, the optimum inundation analysis model was set for each function based on the accuracy of the inundation analysis model and the calculation time.

In addition to the planar distribution of inundation depth, the display function was designed to easily display and output necessary data from the viewpoint of providing evacuation information, such as inundation conditions of houses, roads, and railways.

Key Words : *inundation simulation, inundation display system, evacuation information, effect of flood prevention project*

1. はじめに

全国各地における豪雨の頻発・激甚化を背景に、平成29年水防法改正に基づく「水防災意識社会」の再構築に向けた緊急行動計画¹⁾では、河川管理者からの洪水情報提供の充実が示されており、洪水発生時のソフト対策として避難支援情報を迅速かつ的確に伝達することが求められている。一方で、ハード対策としての河川改修事業を円滑に進めるためには、実際に発生した洪水に対する事業効果を明確に示し住民の理解を得る必要がある。

これらの社会的要請に対して河川管理者には、洪水発生時は時々刻々（リアルタイム）の浸水状況を正確に把握し、避難に必要な時間を考慮した避難支援情報を自治体等に提供することが求められている。

また、洪水後は、河川改修事業による河川水位の低減効果や浸水被害軽減効果等を明確にし、出水報告として速やかに広く一般に開示する必要がある。

しかし、現状においては、洪水時の観測所水位やCCTV等から把握できる現地状況などから浸水発生の可能性を予想し、避難支援情報を提供することとどまっており、浸水範囲や危険度等の定量的な把握・予測は困難な状況である。

また、出水報告については、洪水発生後にコンサルタント等に事業効果の算定を依頼し、一定期間をかけて様式を作成しているため、迅速な対応が困難となっている。

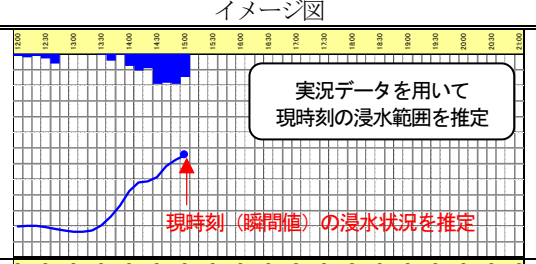
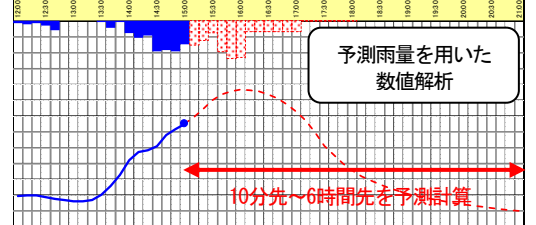
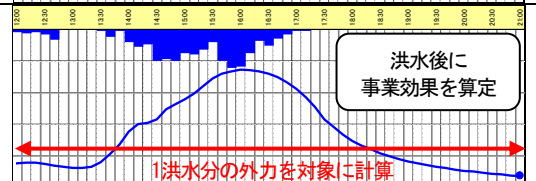
そこで本検討では、河川管理者による洪水時のタイムリーで的確な避難支援情報の提供、および迅速かつ明確な事業効果の提示を目的に、以下3つの機能を有する浸水表示システムを構築した。

①リアルタイム浸水状況把握機能：現時刻の河道水位と氾濫原の浸水状況を推定・表示。

②浸水予測機能：避難支援情報を提供するために必要な河道水位と氾濫原の浸水状況を事前予測・表示。

③事業効果算定機能：洪水後に速やかに河川改修事業等の事業効果を算定・表示。

表-1 各機能における必要要件の一覧表

機能	必要要件	解析モデルの必要事項	イメージ図
① リアルタイム 浸水状況把握	10分間隔で、現時 刻の浸水状況を推 定・表示	・10分以内の解析速度を確保. ・内水位計などで得られる実況データを可能な限り用いて、現時刻の浸水範囲を推定する手法が有効.	 実況データを用いて 現時刻の浸水範囲を推定 現時刻（瞬間値）の浸水状況を推定
② 浸水 予測	10分間隔で、6時間 先までの河道水 位・浸水状況を予 測	・10分以内の解析速度を確保. ・6時間先までを予測する必要があるため、予測雨量を用いた数値解析手法が有効.	 予測雨量を用いた 数値解析 10分先～6時間先を予測計算
③ 事業 効果 算定	河川改修事業の 効果算定 ⁴⁾ (水位低減・ 浸水被害軽減)	・事業投資効果の評価に使用のモデルと整合した高精度な手法を用いる必要あり. ・時間的制約はそれほどない.	 洪水後に 事業効果を算定 1洪水分の外力を対象に計算
凡例：—：計算実行時点までの実績 ●：計算実行時点の現時刻 ---：予測計算対象期間			

2. システムおよび流域の概要

(1) システムの概要

3つの機能を有する浸水表示システムを構築するにあたり、各機能に必要な要件と、それに伴い解析モデルに必要なとされる事項を表-1に示す。本システムは、洪水時における現時刻～6時間先の浸水状況を推定・予測する機能と、河川改修による事業効果を算定する機能を合わせ持つ浸水表示システムである。

(2) 流域の概要

対象流域は、愛媛県を源流とし河口は高知県土佐湾に注ぐ一級水系仁淀川の支川である日下川および宇治川とする。これら支川の平野部は、地盤高が仁淀川本川のH.W.L.より低いうえ、本川から離れるほど低くなる「低典型地形」を呈しており、河川の河床勾配も極めて緩いことから、内外水氾濫を引き起こしやすい地形となっている^{2),3)}。なお、本稿では紙面の都合上、日下川の検討事項を中心に述べることにする(図-1)。

日下川の河川延長は約8km、低平地横断幅は概ね200～500m程度であるため、氾濫原の範囲としては比較的狭小である。さらに、堤防が存在しない区間が大半を占めるため、河道内外が一体となった貯留型の氾濫形態をとる流域である。

これらの浸水被害を軽減・解消するために仁淀川水系には既に5本の放水路が設置されており、現在、日下川において3本目となる放水路が整備中である。

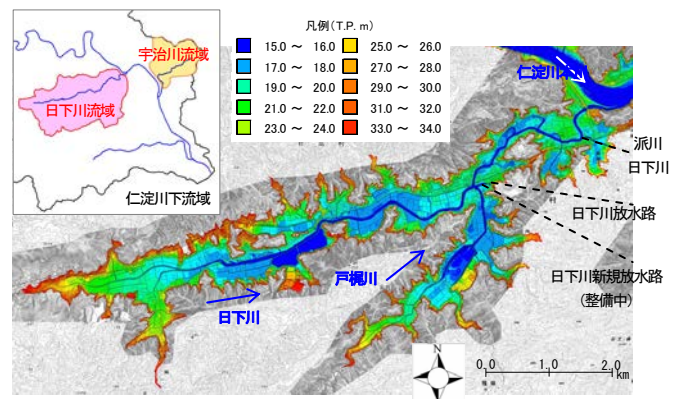


図-1 仁淀川水系日下川の地盤高図

3. 機能毎の要件を満たす浸水解析モデルの選定

本システムで使用する浸水解析モデルは、一次選定で対象流域の氾濫特性を表現可能なモデルを選定した後、二次選定として本システムにおける3機能の必要要件を満たすモデルを選定した。

(1) 一次選定

浸水解析手法として一般的に適用されている次ページ表-2に示す5つの解析モデルの中から、対象流域の氾濫特性を表現可能なモデルとして3つのモデルを選定した。ここで、一次元不定流解析は、流下型の氾濫形態以外での解析精度が低いこと⁵⁾、1池によるポンドモデルは、連続盛土による氾濫域の分断が表現不可能であることから棄却した。各モデルの概要及び一次選定結果を表-2に示す。

表-2 浸水解析モデルの一次選定

モデル	概要	一次選定結果
観測水位レベルバック	観測水位を周囲の氾濫原にレベルバックして浸水状況を算定.	○ 適用の可能性あり.
一次元不定流解析	氾濫原を含めて一次元不定流により浸水状況を算定.	× 流下型氾濫以外での解析精度が低い.
1 池ポンド	氾濫原を一つのポンドとみなし、H-V関係から浸水状況を算定.	× 連続盛土による氾濫域の分断が再現不可能.
多ブロック連結ポンド	氾濫原を複数のポンドとみなし、H-V関係から浸水状況を算定.	○ 適用の可能性あり.
平面二次元メッシュ	氾濫原を解析格子で分割し、二次元解析で浸水状況を算定.	○ 適用の可能性あり.

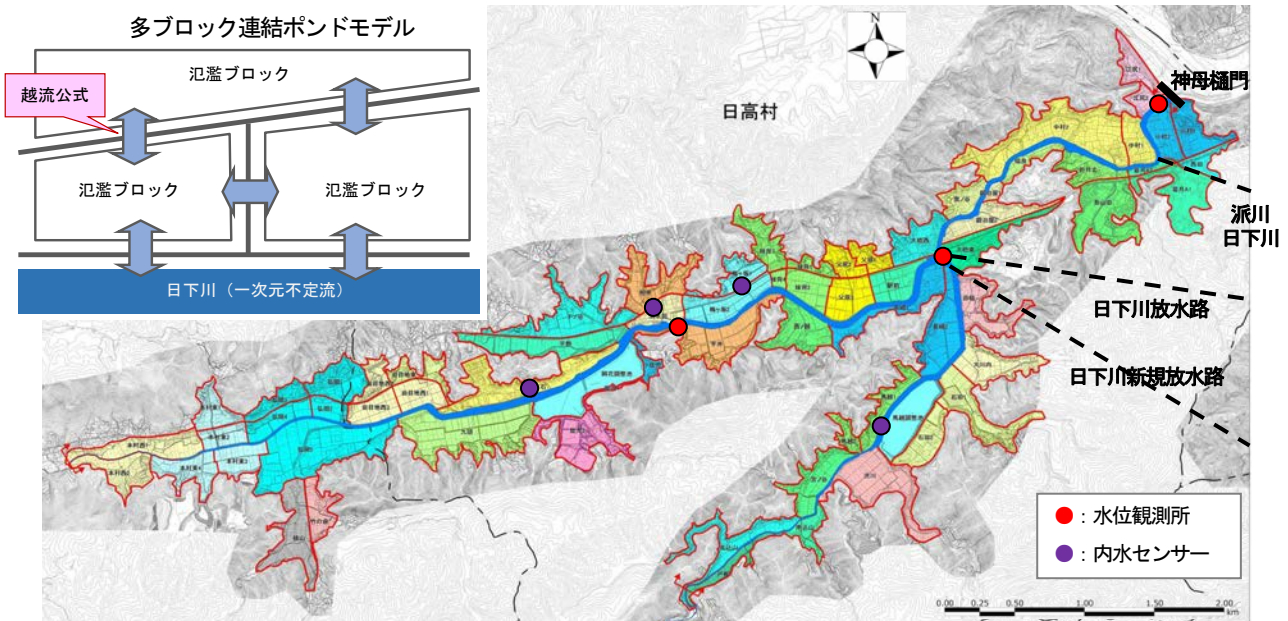


図-2 ブロック分割・水位観測所位置・多ブロック連結ポンドモデル図

(2) 浸水解析モデルの構築

a) ブロック分割

観測水位レベルバックモデルおよび多ブロック連結ポンドモデルは、一様の浸水位になると想定される範囲を複数のブロックに分割し、各ブロックの浸水位から浸水深分布、浸水範囲を求めるものである。これらのモデルの作成にあたり、以下の考え方を基本に氾濫原を計70個のブロックに分割した（図-2）。

- ・仁淀川水系仁淀川 洪水浸水想定区域図（想定最大規模）の浸水範囲を対象とする。
- ・流入水路を踏まえて、縦断的に氾濫原を分割する。
- ・鉄道・国道・県道など周辺地盤より高い箇所、山地の尾根に着目して分割する。

b) 観測水位レベルバックモデル

図-2に示す水位観測所、内水センサーで得られる実績水位を周辺ブロックの浸水位とする。観測所からの距離が離れているブロックについては、各観測所水位を河道測線位置に内挿し、ブロック浸水位は接続する最上流河道測線の水位から算定する。これらのブロック浸水位と10mメッシュ地盤高との関係から10mメッシュの浸水深

を算定する。

c) 多ブロック連結ポンドモデル

河道水位は一次元不定流解析を用いて算定する。氾濫原は図-2に示すブロックで表現し、河川ブロック間、ブロックブロック間の氾濫水の移動量は各々の水位差と盛土高さを用いて越流公式で算定する（図-2左上）。その上で、氾濫ボリュームをもとにH-V関係からブロック内の浸水位を算定し、浸水位と10mメッシュ地盤高の関係から10mメッシュの浸水深を算定する。

d) 平面二次元メッシュモデル

河道水位は一次元不定流解析、氾濫原は図-2に示す範囲を対象に、空間分解能10mで解析可能な平面二次元解析モデルとした。メッシュ分割数は約66,000個である。

(3) 二次選定

対象流域（仁淀川水系日下川）の既往洪水を対象として、3モデルの再現精度と演算時間の相互比較を行った。比較結果を以下に示す（表-3、図-3）。

Model-1（観測水位レベルバックモデル）は、全体的な再現精度は良好であるが、観測水位データが得られな

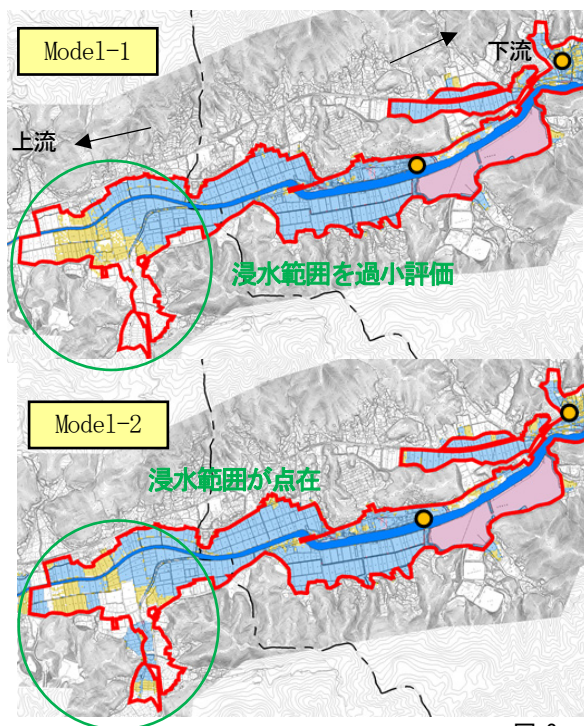


図-3 モデル毎の精度比較

表-4 浸水解析モデルの二次選定

機能	選定モデル	理由
① リアルタイム浸水状況把握	観測水位レベルバック & 多ブロック連結ポンド	・実況水位（浸水位）データを用いて現時刻の浸水状況を推定できる，観測水位レベルバックを採用． ・ただし，観測所水位が得られない範囲（上流部）については10分以内に解析可能な多ブロック連結ポンドを採用．
② 浸水予測	多ブロック連結ポンド	・10分以内に6時間先までの浸水状況を，一定の精度で解析可能．
③ 事業効果算定	平面二次元メッシュ	・最も高精度に浸水状況を算出可能． ・即時性は必要ないため，演算に時間を要しても問題なし．

い上流地区での再現精度が低く，浸水範囲が過小評価となっている（図-3左上）．なお，演算速度は非常に速い．

Model-2（多ブロック連結ポンドモデル）は，Model-1で表現できなかった上流地区の浸水が表現できている．ただし，ポンドモデルはブロック地盤高の低い箇所から浸水が発生するため，浸水範囲が点在している（図-3左下）．なお，演算速度はModel-1と同程度に速い．

Model-3（平面二次元メッシュモデル）は，3モデルの中で最も精度良く浸水範囲が再現できている（図-3右）．一方で，演算には時間を要する．

これらの結果より，演算時間とモデル精度の観点から，各機能へのモデルの適用は表-4の通りとした．

(4) 本システムにおける浸水解析モデルの演算方法

a) 境界条件の設定

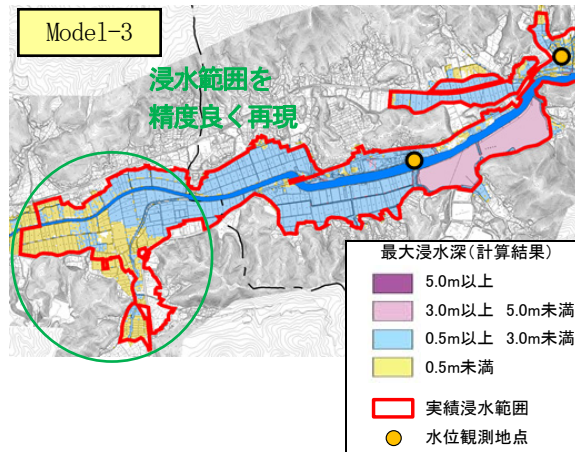
浸水解析モデルの外力条件である流量の設定は，実績および予測雨量を入力条件とした流出解析（準線形貯留型モデル）結果から対象流域への流出量を算定する．

河道の一次元不定流解析における下流端条件は，図-2に示す神母樋門の外水位とする．実績値は統一河川情報

表-3 モデル毎の演算時間

case	モデル名	演算時間※
Model-1	観測水位レベルバックモデル	1min
Model-2	多ブロック連結ポンドモデル	3min
Model-3	平面二次元メッシュモデル	240min

※3日間分の演算にかかる時間



システムより，予測値は他システムである仁淀川本川の洪水予測システムで出力されている神母樋門地点の予測水位より設定する．

その上で，神母樋門の操作として，樋門内外水位の大小関係から樋門の開閉を自動判定（内水位＞外水位：開，内水位≤外水位：閉）し，浸水解析を実施する．

b) 放水路のモデル化

日下川に設置されている3本の放水路（1本は整備中）については，多ブロック連結ポンドモデルと平面二次元メッシュモデルで異なるモデルを構築した．

表-4の選定結果より，10分以内の解析速度が必要となる多ブロック連結ポンドモデルにおいては，予め用意しておいたH-H-Q関係（放水路吐口部の仁淀川本川水位、放水路呑口部の日下川水位、放水路放流量）を用いて放水路からの放流量を算定することにより，一定の解析精度を確保するとともに，演算時間の短縮を図った．

時間的な制約のない平面二次元メッシュモデルにおいては，放水路流れの特徴である圧力状態流れ（満管流）と自由水面流れ（開水路流）の混在を表現できるプライスマン・スロットモデル⁶⁾（管路の頂部にスロットを取



図-4 浸水状況・道路冠水の表示

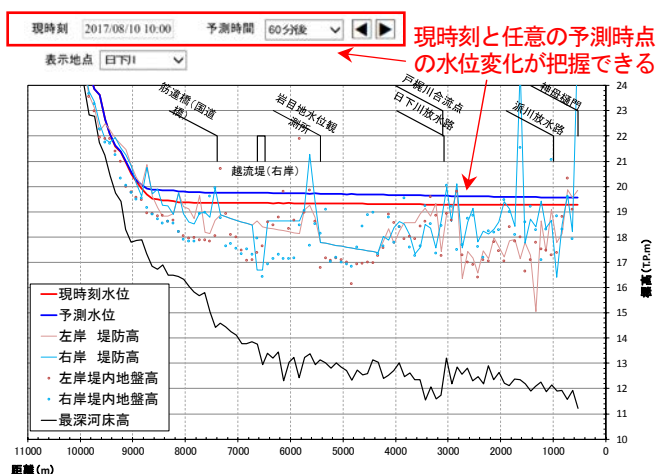


図-5 水位縦断面図の表示

り付けた仮想断面を考え、管水路の流れを開水路の流れとして解析できるように工夫されたモデル)を適用し、解析の高精度化を図った。

4. 浸水状況の表示

(1) リアルタイム浸水状況把握機能・浸水予測機能

洪水時に河川管理者が浸水状況を把握し、タイムリーで的確な避難支援情報を伝達できるよう、10分間隔で現時刻および6時間先までの河道水位と氾濫原の浸水状況の表示を可能とした(図-4・図-5)。同時に、地区毎の浸水面積、浸水戸数および被害額が確認でき、避難時に重要となる道路の冠水状況や、家屋の浸水状況を表示可能とした(図-4・図-6)。

(2) 事業効果算定機能

河道改修、排水機場設置(宇治川のみ)、放水路建設などの既完了事業や新規予定事業による整備段階毎(5段階)の治水効果を視覚的に表示する機能を構築した(図-7)。また、出水後に発表される出水報告様式も自動で作成できる仕様としており、出水時の河川管理者の負担軽減に有効な機能とした(図-8)。

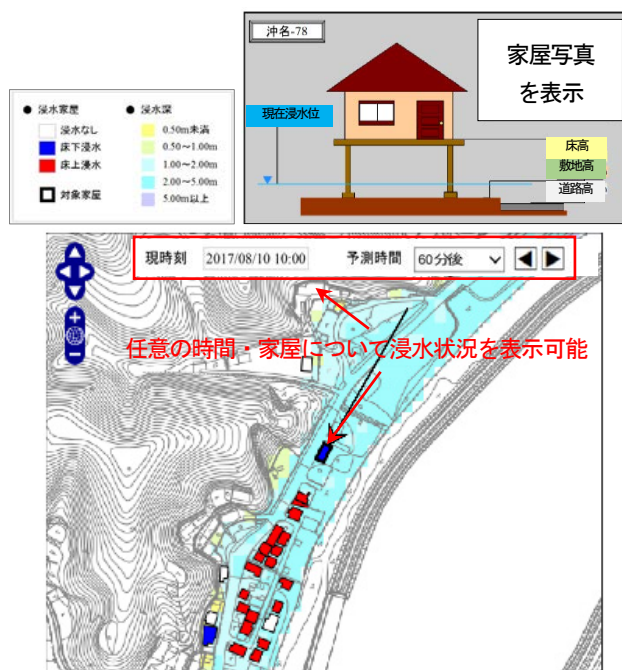


図-6 家屋浸水状況の表示イメージ

任意の整備段階を指定することにより各事業効果を表示可能

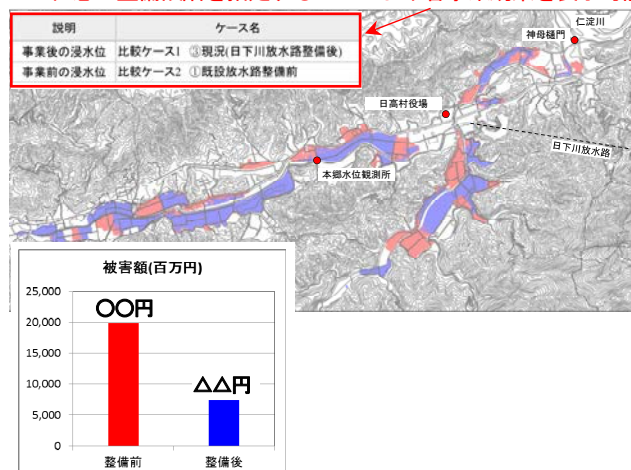


図-7 事業効果の視覚的表示イメージ

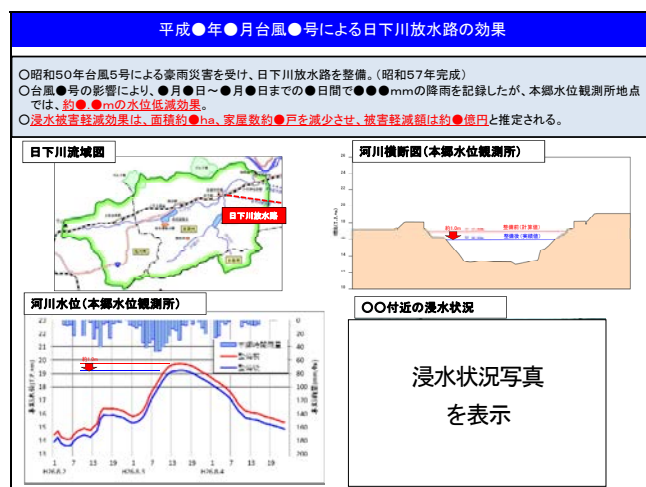


図-8 出水報告様式の自動作成イメージ図

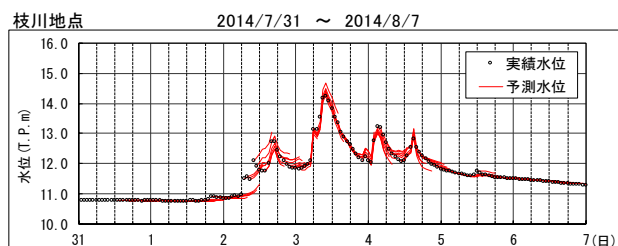


図-9 粒子フィルタ導入後の観測所予測水位（宇治川の事例）

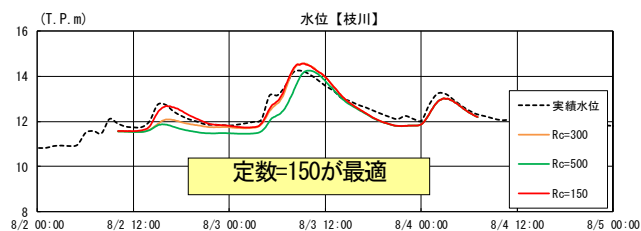


図-10 パラメータ（有効降雨定数）補正結果（宇治川の事例）

5. 各機能の精度向上を図るための手法

各機能を構築するうえで、浸水解析精度を向上させるために実施した手法を以下に示す。

(1) 浸水予測機能へのデータ同化の導入

予測精度を高めることを目的に、現在全国の一級水系で構築されている洪水予測システムにおいて適用されている「粒子フィルタ」を用いた同化手法^{7),8)}を導入した。粒子フィルタは、非線形・非ガウス型の状態空間モデルに適用できるフィルタリング手法であり、状態量の確率分布を多数のサンプル（粒子）の実現値によって近似的に表現することの特徴とした手法である。

同化対象とする状態量は流出モデルにおける流域貯留量とし、氾濫を考慮して算出された基準点水位に対して同化することで、河道水位および氾濫原浸水位の予測精度の向上を図った（図-9）。

(2) 事業効果算定機能へのパラメータ補正処理の導入

浸水シミュレーションの計算精度を高めることを目的として、流出モデルのパラメータ値を自動で補正する処理を導入した。本手法は、水位ハイドロ全体の誤差が最も小さくなる「有効降雨定数」を探索し、精度向上を図るものである。処理方法の概要を以下に示し、算定結果を図-10に示す。

- ・流出モデルの有効降雨定数を変更した「流出＋内水解析」を数ケース実行。計算水位と実績水位を用いて式(1)の誤差指標値Eを算出。
- ・誤差指標値Eの小さいケースを検索して、有効降雨定数の範囲を絞り込み、最適値を決定。

$$\text{誤差指標値 } E = \left| H_j^{(t)} - H_c^{(t)} \right| \quad (1)$$

ここに、 $H_j^{(t)}$ ：実績水位、 $H_c^{(t)}$ ：計算水位である。

6. おわりに

複数機能を有する浸水表示システムを構築することにより、洪水発生時には状況が把握しづらい夜間等においても家屋・道路の浸水状況を把握・予測し、的確に避難支援情報を提供することが可能となった。

洪水後には速やかに出水報告を作成し、迅速に河川改修事業の効果を流域住民に提示することが可能となった。

また、本検討では、浸水状況の推定・予測モデルにフィルタリング手法等を導入することにより、観測値を活用した計算精度の確保を実現した。

本システムの更なる精度向上のためには、今後の出水時の結果をモニタリングし、浸水解析モデルの精度確認や、表示システムの安定稼働の確認などを実施していくことが重要となる。

効果的かつ効率的な災害対応の一環として、災害情報の把握・伝達は今後も更なる高度化が図られると想定され、本システムのような災害対策支援システムの役割は、今後益々重要になると考える。

参考文献

- 1) 国土交通省：「水防災意識社会」の再構築に向けた緊急行動計画，平成29年6月
- 2) 国土交通省 四国地方整備局：仁淀川床上浸水対策特別緊急事業（日下川） 事業評価 資料-6，平成29年8月
- 3) 国土交通省 四国地方整備局：仁淀川床上浸水対策特別緊急事業（宇治川） 事業評価 資料-8，平成29年8月
- 4) 国土交通省 河川局：治水経済調査マニュアル（案），平成17年4月
- 5) 国土交通省，水管理・国土保全局：中小河川洪水浸水想定区域図作成の手引き（第2版），平成28年3月
- 6) Chaudhry, M. H.: Applied Hydraulic Transients, VanNostrand Reinhold, 1979.
- 7) 立川康人・須藤純一・椎葉充晴・萬和明・キムスンミン：粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発，土木学会論文集B1(水工学) Vol.67, No.4, I_511-I_516, 2011.
- 8) 辻倉裕喜・田中耕司・宮本賢治：水位予測における粒子フィルタの適用上の課題とその対応，土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, I_181-I_186, 2016.

(2020. 4. 2受付)