

# 都市域浸水予測・避難支援統合パッケージ システムの実用化に関する研究

## STUDIES ON THE PRACTICAL APPLICATION OF URBAN INUNDATION PREDICTION AND EVACUATION SUPPORT PACKAGE SYSTEM

藤原直樹<sup>1</sup>・荒木千博<sup>2</sup>・森山智<sup>3</sup>・矢神卓也<sup>4</sup>・川池健司<sup>5</sup>・伊東明彦<sup>6</sup>・  
中村謙一<sup>7</sup>・田端幸輔<sup>3</sup>・米勢嘉智<sup>4</sup>・岡峰奈津美<sup>4</sup>  
N.FUJIWARA, K.ARAKI, S.MORIYAMA, T.YAGAMI, K.KAWAIKE, A.ITOH,  
K.NAKAMURA, K.TABATA, Y.YONESE, N.OKAMINE

<sup>1</sup>フェロー会員 工修 株式会社建設技術研究所 中部支社  
(〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-5-13)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 株式会社建設技術研究所 東京本社水システム部  
(〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 株式会社建設技術研究所 東京本社河川部  
(〒330-0071 埼玉県さいたま市浦和区上木崎1-14-6)

<sup>4</sup>正会員 工修 株式会社建設技術研究所 東京本社水システム部  
(〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

<sup>5</sup>正会員 博士(工学) 防災研究所宇治川オープンラボラトリー  
(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

<sup>6</sup>正会員 宇宙技術開発株式会社 宇宙システム技術部  
(〒164-0001 東京都中野区中野5-62-1)

<sup>7</sup>正会員 株式会社建設技術研究所 東京本社河川部  
(〒330-0071 埼玉県さいたま市浦和区上木崎1-14-6)

In recent years, due to the impact of the growing local heavy rains, unpredictable urban flood is increasing rapidly. Meanwhile, the calculation to forecast inundation and current communication systems to avoid disasters remain problems described below.

-Water level prediction and large-scale flood prediction is being prepared and performed in the large rivers, but for the inner water and small rivers, it has not been implemented yet sufficiently.

-In order to minimize flood damages, it is necessary to assist in evacuation, such as by delivering the rapid inundation prediction information. However, currently there is no practical system that is available both for the inundation prediction and analysis in an integrated manner considering complex flow - flood phenomenon of urban areas.

In this study, a model that can predict urban flooding in real time and high precision was developed. In addition, the package system using the model to communicate information effectively was established, which is necessary for evacuation and flood prevention activities.

**Key Words :** Inundation prediction, Disaster evacuation support systems, XRAIN

### 1. はじめに

近年の気候変動や局所豪雨等により、予測困難な都市氾濫が急増している。これらの氾濫は短時間で生じるため、水防活動のための情報提供、住民への災害予報の周知やその後の避難行動を困難にしている。一方、国土交通省では詳細な降雨観測、降雨予測を可能にするXバン

ドMPレーダを全国の人口、資産が集中した大都市を中心に整備しており、上記の観点からもこれを利活用した災害情報システムの構築が期待される。

一方、浸水予測計算及び情報伝達システムには、以下に示す課題がある。

(浸水予測計算における課題)

・河川水位予測、大規模洪水氾濫予測などは、大河川を

中心に実施されているが、中小河川や内水域などでは、まだ十分実施されていない<sup>1)</sup>

- ・下水道水位、内水氾濫挙動予測の実務は海外のモデルが多く用いられており、国内の研究成果等が十分に活用されていない
- ・都市域では、流域・河川・下水道・排水路・氾濫域・地下施設等が複雑に絡み合っており、都市域の浸水状況把握のためには、これらの一体解析が不可欠である
- ・国内で開発された氾濫解析プログラムの演算速度は、リアルタイム浸水予測や情報提供をスムーズに行うための十分な速さを有していない  
(危険情報伝達システムにおける課題)
- ・浸水被害の最小化のためには、浸水状況をいち早く予測し避難等に役立てる必要があるが、都市域の複雑な流出・氾濫現象を一体的に解析し浸水予測を行っている実用システムは現在のところない
- ・これらのシステムは、防災担当や住民等の要求を踏まえ、浸水等の危険情報を監視・予測し、迅速に正確な情報を提供できる必要がある

本研究ではXバンドMPレーダ等を活用し、都市氾濫を高精度にかつリアルタイムに短時間で予測できるモデルの構築及び精度確認を行うとともに、水防活動や避難行動に必要な情報を効果的に伝達する統合パッケージシステムを構築して、実用化に向けて実証実験によりシステムの適用性を確認した。

## 2. 内外水複合氾濫高速予測モデルの開発

以下に示す2種の氾濫予測モデル開発を行い、実流域におけるモデル構築を行った。また、既往出水や模型実験結果等との比較による妥当性検証、演算速度の実用性確認を実施した。

- ・海外ソフトと同等レベルの演算速度と精度が得られる高速氾濫モデル（物理モデル法）
- ・ニューラルネットワークによる事前計算氾濫モデル（瞬時予測法）

### (1) 高速物理モデル法の開発

内外水複合氾濫を効率的にかつ高速に解析するために、水理解析モデルを開発した。物理モデルの概要を図-1に、開発上の工夫を以下に示す。物理モデルは、降雨データを入力条件とし、降雨流出量、河川・下水道網の水位・流量、地表面への氾濫・戻りを解析し、浸水地点及び浸水深を予測する。複雑なネットワーク構造を形成している河川・下水道網及び道路網では、ノード（マンホール、交差点）とリンク（下水道管渠、道路）によりモデル化し、一次元不定流ネットワークモデル<sup>2)</sup>により水理量を算出するものとした。また、下水道網、道路網が発達した市街地ではノード・リンク数が膨大となり、計算負荷が大きくなる。このため、

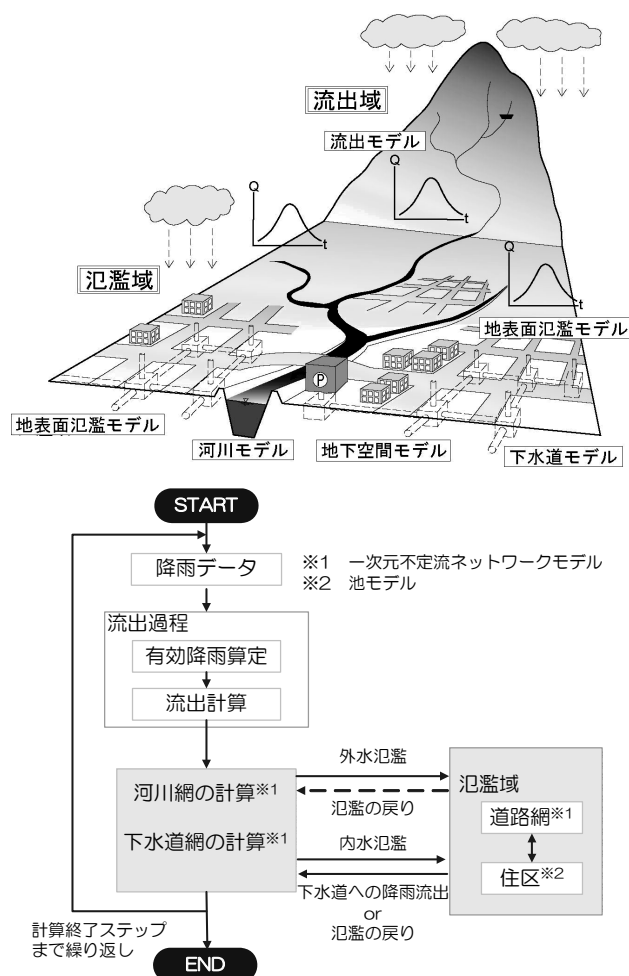


図-1 高速物理モデルの概要

表-1 モデル化及びプログラミングによる高速化の工夫

高速化 検討手法	内容	計算速度 の向上率
① ソースコード修正	・リンクとノード間の流量 制御ルーチンを追加	3.5倍
② モデル化の工夫	・下水道及び道路リンク分 割数の減少	1.4倍
③ 並列化処理	・OpenMPIによる並列化	1.8倍 (4CPU使用時)
トータル (①×②×③)		8.8倍

表-1に示す改良を行った。

- ①ソースコードの修正：ノード・リンク間の流量は、堰の越流公式（またはノード・リンク間の水位差から算出する方法）により算出されるためノード内に存在する水のボリュームを超える流量が算出され、その後の計算が発散する場合があります。計算時間刻みを小さくすることで対処する必要があった。本研究では、水収支を満たすように流量を制御することで安定的な解析を可能とした。
- ②モデル化の工夫：下水道及び道路リンク分割数を減らすことで計算負荷の低減を図った。
- ③並列化処理：OpenMPを導入し、複数CPUを使用した並列化処理ができるように改良した。

なお、改良前後において浸水位置・浸水深の解析結果が大きく変化しないことを確認している。以上の改良によりトータルで8.8倍の演算速度向上を実現し、MOUSE、InfoWorks等の海外市販ソフトウェアと同等レベルの演算速度を確保した。

## (2) 模型実験結果との比較

リアルタイム浸水予測解析モデルの構築にあたり、その妥当性の検証は「現地での実証実験」を通して実施する。しかしながら、実際の浸水実績からの検証のみでは以下の点が課題となり、解析モデルが正しく浸水現象をとらえているかを明確にできない可能性がある。

- ・降雨、水位、浸水位等の時系列データや土壌浸透等の流域データが十分得られない
- ・局所豪雨の氾濫現象では正確な氾濫実績が得にくい
- ・複数の要因による側溝堆積土砂等の局所的な要因による浸水のモデル化が困難である

本研究では、これらの問題を解決するために、京都大学防災研究所内に作製した「下水道管渠と詳細な排水システムを含んだ氾濫域模型実験施設<sup>3)</sup>」と同じモデル構築を物理モデル法により行い、実験結果と解析モデルによる計算結果の比較により、開発モデル（(I)①ソースコード修正後）の妥当性検証を行った。

模型実験施設の概要を図-2に、解析結果と模型実験結果との比較例を図-3に示す。定常状態の開水路流れ（図-3a）参照）、及び非定常状態の圧力流れにおける街路の浸水位（図-3b）参照）ともに良好な再現結果が得られることを確認した。

## (3) 瞬時予測法

対象エリアが小さく、降雨発生から浸水被害発生までの時間が短い地域においては、降雨・流出過程、氾濫過程をリアルタイムで解析して浸水を予測するのではなく、事前に計算・整理しておいた降雨パターンと浸水状況等をあらかじめデータベース化しておき、現在及び予測される降雨状況等からパターンマッチングを行い、瞬時に浸水を予測する手法が適切、現実的である場合がある。

本研究では、中北らの研究<sup>4)</sup>による事前計算法を参考に、後述する実証実験エリアで内水氾濫解析モデル構築を行い、既往洪水の浸水箇所の再現計算を行い、精度を確認した（図-4 参照）。

以下に検討した瞬時予測法の概要を示す。

（教師データ）

- ・降雨分布：流域一様降雨及び偏在性降雨提供パターン
- ・降雨波形：中央集中型モデルハイエト
- ・降雨規模：規模を変化させ5パターン設定
- ・浸水深及び浸水範囲：物理モデル法による解析結果（パターン分類）
- ・類似浸水メッシュをエリア毎にグループ化（K-平均法）

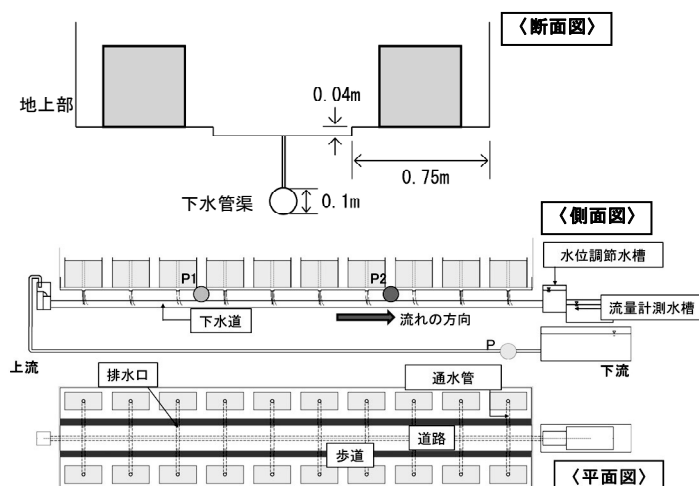
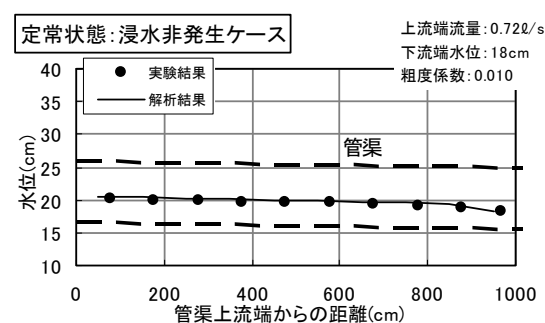
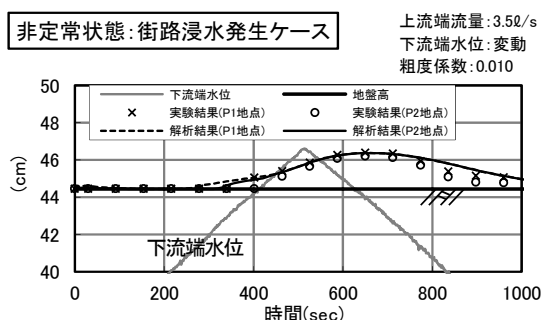


図-2 模型実験装置概要



a) 定常状態：浸水非発生ケース（管渠内水位）



b) 非定常状態：街路浸水発生ケース（街路水位）

図-3 物理モデル法と実験結果との比較例

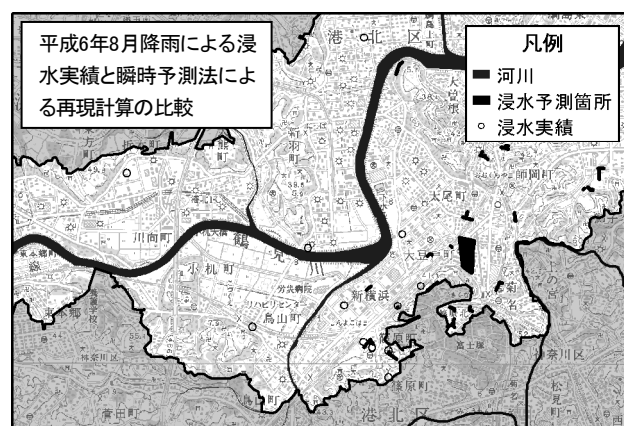


図-4 瞬時予測法の再現結果



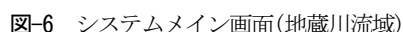
- ・重相関解析により優位性の高い降雨情報を選定
- ・予測降雨から直接浸水深を求めるシステムの構築

2. で検討した氾濫予測モデルを搭載し、危険情報の収集・予測・配信パッケージシステムを開発した。以下に開発パッケージシステムの概要をまとめる。

本システムの特徴は、プッシュ型情報として浸水予測情報を携帯電話に配信し、プル型情報として、スマートフォン、PC上で詳細予測情報ならびに関連情報ならびに関連情報を提供する点である。パッケージシステムのイメージ図を図-5に示す。

- ・雨量：実況(Xバンドデータ)+予測(降雨ナウキャスト), 名大モデル<sup>5)</sup>(予測モデル雨量)
- ・浸水深(予測)：浸水予測計算エンジン

〈雨量アラート〉	メール タイトル	「緊急雨量情報(試験運用中)」〇〇日〇〇時〇〇分現在
	メール 本文	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 予測を使用: 『〇〇区・市で〇〇時〇〇分までの1時間に〇〇mmの雨量が予測されています。』</li> <li>・ 実況のみを使用: 『〇〇区・市で〇〇時〇〇分までの1時間に〇〇mmの雨量が観測されています。』</li> <li>・ 名大モデルを使用: 『〇〇〇〇(例:尾張東部)で今後3時間に100mm超の豪雨が予測されています。』</li> </ul>
〈浸水アラート〉	メール タイトル	「緊急浸水情報(試験運用中)」〇〇日〇〇時〇〇分現在
	メール 本文	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 浸水予測計算結果を使用: 『〇〇時〇〇分現在, 〇〇市〇〇丁目で〇〇分後に〇〇cmの宅地浸水(or道路浸水)が予測されています。避難体制の確保が必要です。』</li> <li>・ 浸水センサーを使用: 『〇〇(←設置地点名)で〇〇cmの浸水が観測されました。避難態勢の確保が必要です。』</li> </ul>



また、降雨量アラートと浸水アラートの配信文は、表-2の通りとした。

スマートフォン、PC用の表示システムは、予測浸水情報やXバンドMPレーダと降水ナウキャストの雨量情報に加え、河川水位情報やTwitterからの情報について容易にアクセスできるシステムを構築した。図-6にシステムのメイン画面を示す。

4. で記述する実証実験エリアでシステム構築を行い、目標としていた5分間に1回の予測計算が可能であることを確認した。

表-3 実証実験の内容

モデル構築及びシステム開発の内容		実証実験対象エリア		
浸水予測モデル構築	物理モデル法	地蔵川	鶴見川	神田川
	瞬時予測法	○	○	○
リアルタイムパッケージシステム構築及びアラート配信		○※1	○※2	
浸水センサの設置・観測		○		
広域モデルによる速度確認				○

※1 対象モニター：中部地整、庄内河川、愛知県、名古屋市、春日井市

※2 対象モニター：関東地整、京浜河川、神奈川県

表-4 実証実験における計算条件

項目	条件
使用ハードウェア	プロセッサ：intel(R) Xeon(R) CPU E5-2687W 3.10GHz コア数16 スレッド数32 実装メモリ：RAM: 16.0GB システム：64ビット オペレーティングシステム (国土交通省の各河川事務所に通常導入されているサーバと同クラス程度のコンピュータ)
対象エリア	100km <sup>2</sup> 程度の流域
予測時間及び予測ピッチ	1時間先まで5分ピッチで予測し、アラート配信 データ受信及び出力アラート配信のために必要な時間：約1分 演算に必要な時間（φ800mm程度以上の下水道管渠をモデル化）：4分以内

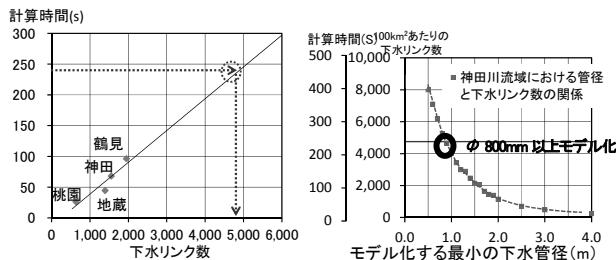


図-7 下水リンク数と計算時間の関係

尚、浸水予測の必要演算時間は、下水・街路ネットワークのリンク数に左右され、リンク数は下水道ネットワークのモデル化最小管径が支配的となる。実証実験ではφ800mm程度以上の管径をモデル化し、必要な精度が確保されていることを確認した（図-7参照）。本システムを100km<sup>2</sup>を超えるような大流域に適用する際にはモデル化・下水道管渠のランピング等の処理が必要となる。

#### 4. 現地実証実験

2. で構築した危険情報の収集・予測・配信パッケージシステムを、鶴見川流域、庄内川支川地蔵川流域、神田川流域に試験導入し、防災担当者、河川管理者、下水道管理者等の特定モニターを対象とした情報提供の実証実験を行い、これを踏まえたシステム改良を実施した（表-3及び表-4参照）。

##### (1) 地蔵川H25.9.4出水でのアラート配信

実証実験を実施した3河川のうち、地蔵川においてH25.9.4に流域内の雨量観測所で時間雨量84mm、総雨量106mmの局所集中型の豪雨が発生し、家屋の浸水、道路冠水がもたらされた。物理モデル法による浸水予測モデルでも同降雨による浸水を予測しており、図-8に示すと

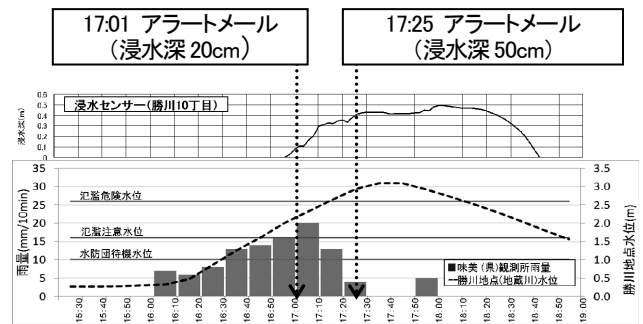


図-8 地蔵川におけるH25.9.4降雨の浸水アラート

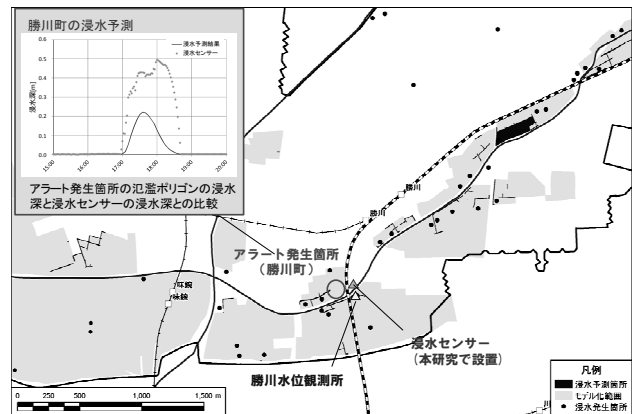


図-9 物理モデル法によるH25.9.4降雨の浸水予測結果

表-5 実証実験ヒアリングの主な意見

モニター	主な意見
河川管理者（国）	・内水氾濫がわかると樋門操作や水防活動を実施する職員に伝えられる
河川管理者（県）	・縦断的な河川水位の予測がほしい ・アラート配信は浸水が始まる前にほしい
防災担当者（政令市）	・市全体の浸水予測がわかるとよい ・降雨分布と河川水位を画面上重ねてほしい
防災担当者（市）	・浸水対策の応援派遣に浸水予測が役立つ ・ツイッターはテキストだけでも初動に使える

おり、本研究で設置した浸水センサーの観測水位が上昇すると同時期にアラート配信が行われた。図-9がアラート配信時の浸水予測結果であり、浸水箇所及び浸水している時間帯も精度良く再現されている。これより、リアルタイムでの浸水予測モデル及びアラートシステムの適用性を確認した。

##### (2) 実証実験のヒアリング結果

対象モニターに対して、実証実験のヒアリングを行い、構築したシステムに対して表-5に示す意見が得られた。リアルタイムの浸水予測システムという先駆的なシステムを防災担当者に初めて触れて頂くことで、河川管理者・防災担当者が必要と考えるパッケージシステムのあり方も明らかになった。

管理者・防災担当者が災害時に対応する領域は、国、県、市町村で異なり、またその組織の規模によっても異なる。例えば、国土交通省・県の事務所は管轄河川の水

100km <sup>2</sup> 程度		500km <sup>2</sup> 程度	
狭域		広域	
	防災担当者向け (市町村)	河川管理者向け (国交省河川事務所、 都道府県・政令市出先機関)	河川管理者・防災担当者向け(都道府県・政令市本庁):広域管理
豪雨時 対応	水防活動・避難勧告	河川水位把握・関係自治体へ情報提供(洪水予報・水位周知)	河川水位把握・関係自治体へ情報提供(洪水予報・水位周知)
必要となる情報	狭域の浸水予測 ・河川水位 ↓ 物理モデル法による高精度予測	管轄流域内の浸水予測 ・河川水位 ↓ 物理モデル法による高精度予測、瞬時予測法による補完的な予測	管内全域浸水予測 ・河川水位 ↓ 瞬時予測法による広域予測、広域簡易予測法による広域予測

図-10 対象流域の大きさと必要情報の関係

位情報の収集を重点的に行い、市区町村などは地域の浸水箇所も情報収集する必要がある。このため構築するパッケージシステムは浸水予測モデルをベースとはしているが、それぞれの管理者に必要となる要素情報（水位予測、浸水予測、浸水センサー、つぶやき情報などの各種情報）を組み合わせ適用していくことが必要となる。

その中でも、特に多くの防災担当者が必要と考える情報として、「市域全体といった広範囲の浸水予測」、「高精度な降雨予測」、「精度の高い河川水位予測」が求められていることが明らかとなった。

## 5. 統合パッケージシステムの方向性

今後もニーズを満たすための浸水予測避難支援統合パッケージシステムの早期実用化・発展が望まれるが、その方向性について以下に整理する。

### (1) 高速広域浸水予測システム

本研究では、物理モデル法による詳細予測システムを100km<sup>2</sup>程度の流域に適用できることがわかったが、これでは、広域の防災担当者が必要とする情報の一部しか得ることができない場合があることが明らかとなった。

そのため今後は、図-10のように広域で内水はん濫を高精度に表現できるモデルの研究開発を進めて行くことが重要であるが、広域モデルの開発においては、モデル構築そのものが容易にできることも重要な要素となる。そのため、例えば下水道モデルを省略するなどの流域条件の大胆な簡略化を行った上で、高い精度を維持することが、広域の浸水予測システム普及のためには不可欠である。

### (2) 高精度降雨予測

降雨予測の精度は近年向上してきているものの、高精度化が必要で、そのニーズは高い。XバンドMPレーダの三次元情報を活用した新たな予測手法等が近年開発されており<sup>9)</sup>、それらを現場に積極的に適用していくことも重要である。

## (3) 河川水位予測高度化

河川水位予測の精度向上を前提として、管理者の防災体制に資するように、縦断的に河川水位を予測し危険箇所が即時把握できるようにするなどのシステム改良も有効であると考えられる。

## 6. まとめ

本研究により得られた成果は以下の通りであり、今後の浸水予測情報の迅速な提供に関する提案をすることができた。

- ・避難行動に要する時間、精度を確保したリアルタイム浸水予測モデルを構築することができた。
- ・構築モデルを組み込んだ、水防活動、避難行動に必要な情報を効果的に伝達するパッケージシステムを開発することができた。
- ・構築モデル及びシステムの実エリアでの適用性検証により、ユーザの潜在的なニーズを把握することができ、今後の研究の方向性を示すことができた。

今後も、実証実験を継続し、5. で述べた浸水予測、避難支援統合パッケージのあり方を踏まえたシステムの実用化に向け、研究を継続していく。

**謝辞：**本研究は平成24年度河川砂防技術研究開発公募に採択され実施したものである。本研究に際し、実証実験に参画して頂いた、国土交通省中部地方整備局、庄内川河川事務所、愛知県、名古屋市、春日井市、京浜河川事務所、神奈川県の皆様に、この場を借りて感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) "水災害の監視・予測の高度化に関する研究" 平成23年度国土交通省国土技術研究会
- 2) 井上和也、戸田圭一、林秀樹、川池健司、坂井広正: "市街地における氾濫解析モデルの考察" 京都大学防災研究所年報 第41号 B-2. (1998)
- 3) 川池健司、清水篤、馬場康之、中川一、武田誠: "下水道を含めた氾濫模型実験による内水氾濫解析モデルの検証" 水工学論文集 第55巻. S\_985-S\_990 (2011)
- 4) 中北英一: "ゲリラ豪雨予測手法の開発と豪雨・流出・氾濫を一体とした都市スケールにおける流域災害予測手法の開発 報告書 H24.3" 河川砂防技術研究開発公募
- 5) 坪木和久: "XバンドMPレーダと雲解像モデルによる短時間・極短時間量的降水予測法の開発 報告書 H24.3" 河川砂防技術研究開発公募

(2014. 4. 3受付)