

浸水情報を活用した リアルタイム氾濫予測システムの開発

勝原 亮介¹・船橋 昇治²・久保 英二郎¹・銭 潮潮³・
朝堀 泰明⁴・池内 幸司⁵

¹ (一財) 河川情報センター 河川情報研究所 研究第3部 研究員

² (一財) 河川情報センター 河川情報研究所 研究第3部 部長

³ (一財) 河川情報センター 河川情報研究所 研究第3部 主任研究員

⁴ (一財) 河川情報センター 業務執行理事

⁵ (一財) 河川情報センター 理事長

本研究は、速やかな氾濫計算を実施するとともに氾濫原から得られる浸水情報をもとに補正することで、河川からの氾濫発生後に氾濫域の予測結果を速やかに提供するためのシステムを開発することを目的としている。本論文では、「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期」の一部として河川情報センターが実施している研究開発のうち、リアルタイム氾濫予測システムの研究概要及び方針について報告する。

本研究で構築した DMD による氾濫解析と浸水センサによる補正手法を組み合わせたプロトタイプ of 計算システムを用いることで、氾濫原より得られた浸水情報に基づき氾濫予測結果の補正が可能となり、その結果、より実態に近い浸水状況を再現しつつ氾濫予測が可能となることが確認された。

Key Words: SIP, 浸水情報, DMD, リアルタイム氾濫予測, 災害リスク情報

1. はじめに

近年、気候変動等の影響により、水災害が頻発している。近年の水害では、避難指示等が出ているにもかかわらず多くの住民が避難行動に移らない等の避難の遅れにより、多くの犠牲者や救助者が発生している。2018 年 7 月の西日本豪雨災害における広島県、岡山県、愛媛県の被災者を対象としたアンケート¹⁾によると、最初に避難するきっかけとして約 1/3 が「浸水や川の増水など周辺の環境の変化」と回答しており、浸水が間近に迫ってからの避難行動の判断では逃げ遅れる可能性が高い。また、2019 年の台風 19 号で千曲川が決壊した長野市の被災世帯を対象とした避難行動に関するアンケート結果²⁾によると、避難勧告等の内容に対して「緊迫感が伝わってこないなど、どのくらい危険な状況か分かりにくかった」との回答が 41.8%と最も多く、避難勧告等の情報は得られているが危険性が十分に伝わっていないのが実態である。このような状況において、命を守る避難行動を促すために氾濫発生時に避難行動の最後のきっかけとなるリアリティのある浸水予測の情報提供が重要となる。また、2015 年の常総水害では、避難の遅れ等により多

くの住民が孤立し、約 4300 人（そのうちヘリによる救助者数は約 1300 人）が救助された³⁾。常総市の避難指示・避難勧告の対象となった地域住民に対する調査結果⁴⁾によると、常総市の立ち退き避難をした人は約 6 割と高かったが、屋内に留まった人の半数近くの人が決壊しても自分のいる場所は浸水しないと考えており、結果的に半数以上が孤立している。ただし、決壊箇所から約 10km 離れた常総市役所まで氾濫域が到達したのは堤防決壊から約 8 時間後であった⁵⁾。堤防の決壊箇所から離れたエリアでは、決壊後から避難を開始したとしても、氾濫水が到達するまでの時間を活用することにより、安全に避難することが可能である。このように、堤防の決壊後であっても、その後の適切な避難行動を促すうえで、氾濫予測情報は有益である。

近年では浸水センサやカメラ画像等から得られる浸水に関する情報が増加しており、浸水の発生状況をリアルタイムに把握することが可能になりつつある。例えば、国土交通省では、浸水被害の発生を速やかに把握し、その情報を地域住民や水防管理者等へ迅速に提供するために「ワンコイン浸水センサ実証実験」を 2022 年 8 月 25 日より開始している⁶⁾。このような浸水に関する情報は

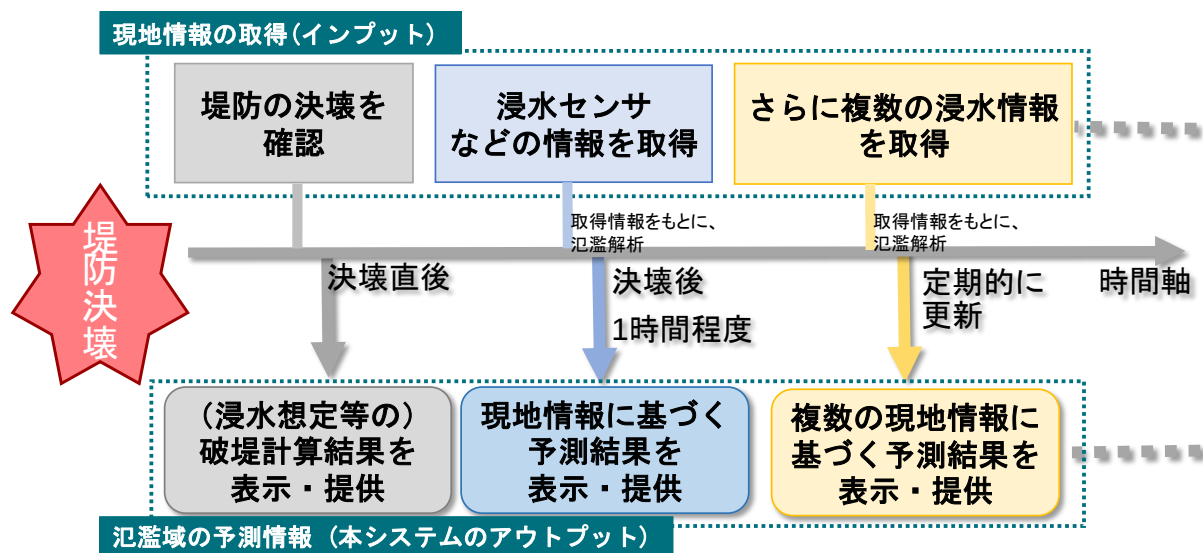


図-1 氾濫予測システムのイメージ図

現状の浸水状況の把握のみでなく氾濫予測情報の提供を行う上でも有効である。しかしながら、氾濫予測を行うためには次のような技術的な課題がある。従来の物理モデルでの氾濫計算には演算時間がかかるという時間的な制約が挙げられる。また、氾濫域が広く予測時間が長いほど氾濫速度や浸水深について実現象と計算結果との間に乖離が生じるという精度上の課題が存在する。

以上のような背景を踏まえ、本研究では速やかな氾濫計算を実施するとともに、氾濫原から得られる浸水情報をもとに計算結果を補正することで、河川からの氾濫発生後に氾濫域の予測情報を速やかに提供するためのシステムを開発することを目的とする。

なお、本研究は、「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第3期」の一部として河川情報センターが実施している研究開発であり、本論文ではリアルタイム氾濫予測システムの研究概要及び方針について報告する。

2. 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)

SIPは総合科学技術・イノベーション会議(以下CSTI)が司令塔機能を発揮し、府省の枠や分野を超え、実用化・事業化まで実施する国家プロジェクトである⁷⁾。昨年度からは第3期(2023~2027年度)が開始され、「スマート防災ネットワークの構築」の課題が設定され、先端ICT、AI等を活用した国・自治体・企業・個人による災害対応力の強化・向上を目指している。

第3期のサブ課題「リスク情報による防災行動の促進」では、北海道大学(研究責任者:山田朋人教授)を中心に、個人・企業等が災害を「ジブンゴト」とであると強く認識し、自らの行動を目に見える形で「変容」させることを目指しており、河川情報センターは「防災行動を促

すリアルタイム災害リスク情報の評価・生成技術」のテーマで研究開発に参加している⁸⁾。

河川情報センターは以下に示す3項目の研究開発を実施するために、4つのシステムを社会実装に向けて検討を進めている。

【研究開発】

- ① 災害をジブンゴトとして認識できるリアリティのある個別具体的な情報をタイムリーに提供するシステムの開発
 - ・リアルタイム浸水範囲把握システム
 - ・リアルタイム氾濫予測システム
- ② 災害発生時に避難指示発令等の市町村の災害対応を支援するシステムの開発
 - ・デジタル防災タイムライン
- ③ 災害が差し迫った状況の時に、具体的にどのような行動をとればよいか把握できる情報を提供するシステムの開発
 - ・水害ジブンゴト化支援ツール

本論文では、上記研究開発のうちリアルタイム氾濫予測システムの研究概要及び現在の進捗状況を報告する。

3. 氾濫予測システムの概要

(1) 氾濫予測システムの概要

現在提供されている浸水想定等の情報としては、浸水想定区域図や浸水ナビが挙げられるが、事前に設定された条件下での浸水想定情報であるため想定最大規模等の最大リスクの把握は可能であるものの実際の浸水状況との間には乖離がある。また、堤防の土質条件や堤防の崩壊過程などには不確実性が内在することから、堤防決壊時の氾濫量を精度よく事前に推定することやリアルタイ

ムでそれらの状況を把握することは困難である。このため、堤防決壊状況を計算条件とする氾濫予測手法についても同様に、精度良く予測することは困難と言える。

一方、近年では浸水センサの導入を始め、空撮画像による浸水域の推定技術や、SNSにて発信された浸水情報の活用など、リアルタイムで取得可能な浸水情報が増加しており今後も増加することが見込まれる。これらの情報を活用することで、より実態に近い氾濫域の予測情報をリアルタイムで生成することが可能になると考えられる。さらに、最新の浸水情報をもとに氾濫予測結果の精度を向上させることで定期的な更新が可能となる。

氾濫予測システムのイメージは次の通りである。①堤防の決壊が確認されたら浸水想定区域図等の事前の計算結果を速やかに提供する。②浸水センサなどの浸水情報が取得された段階で、氾濫予測結果の精度を上げるために、取得情報に基づく補正を行う。③最新の浸水情報をもとに氾濫予測結果を定期的に更新する。氾濫予測システムのイメージを図-1に示す。

(2) 氾濫予測システム開発に向けての研究課題

氾濫予測システムを構築する上での技術的な課題として、a) 氾濫解析の演算高速化、b) 浸水情報を用いた氾濫解析の補正手法の構築が挙げられる。

a) 氾濫解析の演算高速化

災害時においてリアルタイムで迅速な情報提供を行うためには氾濫解析の演算速度を向上させることが必要不可欠である。また、浸水情報を用いた補正計算を実施するためには、複数の氾濫計算を繰り返し実施する必要があることから、より高い水準での計算の高速化が必要である。

b) 浸水情報を用いた氾濫解析の補正手法

既往研究において、データ同化を用いた氾濫計算手法が提案されている。佐山ら⁹⁾は氾濫発生後に氾濫原内の種々のセンサから浸水深を取得できることを前提に浸水深の推定・予測手法を構築している。また伊藤ら¹⁾は氾濫原内のセンサ情報を用いてアドジョイン法を適用し、氾濫ハイドログラフを逆推定する手法を構築している。しかしながら、これらは浸水センサから浸水深の時系列情報が得られることを前提としているが、現在導入が進められている浸水センサからは浸水の ON/OFF の情報のみが得られるという実態に即したものになっていない¹²⁾。

このように、社会実装に向けては実際に取得可能な浸水情報による補正手法を確立する必要がある。

(3) 課題解決のための研究方針

(2)の課題に対して、以下の研究方針のもと検討を進めている。

a) 氾濫解析の高速化に関する研究

計算に時間のかかる物理モデルの高速化と並行して、物理演算を行わずに氾濫現象を再現するための代替的な計算手法（サロゲートモデル）による演算時間の短縮を研究している。具体的には、以下に示す複数の氾濫解析モデルから、計算速度・精度等から総合的に考慮し優れているモデルを選定することを想定している。

（氾濫解析モデルの候補）

- ・浅水流方程式
- ・浅水流方程式（移流項なし）
- ・拡散波方程式
- ・地形適合格子（非構造格子）モデル
- ・DMD（動的モード分解）の氾濫解析への適用

b) 浸水情報を用いた氾濫解析の補正手法に関する研究

実際に取得可能な現地情報を活用した氾濫解析の補正手法を検討する。取得可能な浸水情報の候補としては以下を想定している。

（現地情報の候補）

- ・浸水センサによる感知情報
- ・カメラ画像
- ・SNS 情報
- ・航空写真、ドローン等による撮影画像

4. 氾濫解析の高速化

本研究における1つ目の課題である氾濫解析の高速化に対して、複数のモデルから精度を確保しつつ計算の高速化を図る技術開発を進めている。以下では複数のモデルのうちサロゲートモデルである DMD による氾濫解析の高速化について記述する。

(1) DMD による氾濫解析の実施

DMD（Dynamic Mode Decomposition）は流体解析の分野において実験や数値シミュレーションで得られる時空間データの中から特徴構造（モード）を取り出す手法である。取り出したモードを用いることで再解析及びその時間発展を考慮できる。

小山ら¹³⁾は DMD を用いた氾濫解析手法を提案し、精度よく且つ高速に演算可能であることを示している。本研究では、小山ら¹³⁾の提案を基に DMD による氾濫解析の高速化の検討を進めている。

DMD による氾濫解析を実施する手順は、①氾濫シミュレーションの実施、②氾濫解析結果に対するモード抽出、③DMD モードを用いた氾濫解析の実施である。

DMD モデルの構築にあたっては、事前に DMD モードを抽出するための氾濫解析結果を必要であるが、社会実装を見据えるとモデル構築のための労力をなるべく削減することが望ましい。この点に関しては既往の浸水想定

区域図検討時の氾濫解析結果あるいは氾濫解析モデルを活用することで、労力を削減でき、社会実装のハードルを下げる可以考虑。

(2) DMD による氾濫解析の高速化

従来の物理モデルでは氾濫計算に数時間程度を要するが、補正計算による更なる計算量の増加を鑑みて氾濫予測計算を 1 分以内で終わることを想定すると従来モデルよりも少なくとも約 50 倍程度計算速度を早くする必要がある。

そこで、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨において大規模な水害が発生した鬼怒川流域を対象に計算時間の試算を実施した。なお、解析時間は 24 時間、格子サイズは 25m とし、計算に使用したサーバスペックは表-1 に示す通りである。その結果、図-2 に示すように物理モデル（浅水流方程式）による氾濫解析にかかる時間は 1～2 時間程度であったのに対して、DMD による氾濫解析にかかる時間は 10 秒程度であり、従来モデルに比べて 100 倍以上の速度が得られることが確認された。これより、DMD を用いた氾濫解析により補正計算を含めた氾濫予測計算をリアルタイムで実現することが可能になると考えられる。

5. 氾濫解析の補正手法

本研究における 2 つ目の課題である氾濫解析の補正手法に対して、実際に取得可能な浸水情報を活用した氾濫解析の補正手法の検討を進めている。以下では、浸水情報のうち浸水センサによる補正手法について記述する。

DMD モデルでは境界条件として氾濫流量を直接与えることはできない。一方で DMD には空間と時間発展に関するモードが存在しており、モードの値を変更することで浸水深や伝搬速度を調整することが可能である。そこで構築した DMD モデルに対して、浸水の観測情報に合わせて補正するためのパラメータを導入した。導入したパラメータに対して浸水センサの反応状況等を再現するように最適化計算をすることで、現地浸水情報による氾濫計算の補正を実施した。

6. 2015 年関東・東北豪雨におけるプロトタイプによる試算

2015 年関東・東北豪雨における常総市周辺を対象に、DMD による氾濫解析の高速化と浸水センサによる氾濫解析の補正手法を組み合わせた計算手法を適用したプロトタイプによる試算を実施した。

表-1 計算機スペック

項目	内容
CPU	Intel Xeon Gold 6254×2（ベース周波数 3.1GHz、コア数 18、スレッド数 36：ハイパースレッディング有効時）
RAM	376GB

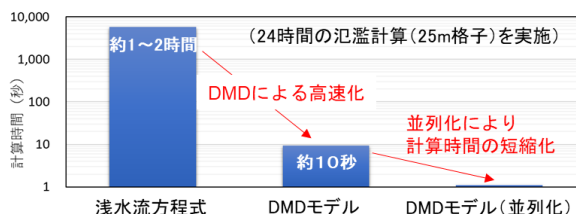


図-2 計算時間の試算結果

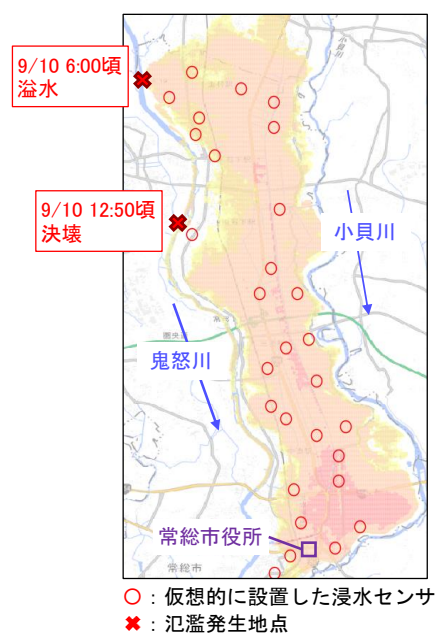


図-3 対象範囲及び浸水センサの配置位置

(1) 検証方法

2015 年関東・東北豪雨 常総市周辺を対象とした検証方法を以下に示す。

a) 対象範囲及び正解データの作成

対象は 2015 年関東・東北豪雨における茨城県常総市周辺（鬼怒川、小貝川沿川）とした。検証用の正解データは、若宮戸地区（鬼怒川 25k 付近）における溢水および三坂地区（鬼怒川 21k 付近）における堤防決壊を氾濫計算により再現することで作成した。なお、氾濫計算は浅水流方程式により実施し、その他の条件は浸水想定図作成時と同条件とした。

b) 浸水センサの配置と反応データ作成

浸水センサについては、図-3 に示す位置に仮想的に配置した。a) で作成した正解データから浸水センサの反応時刻を抽出し、浸水センサの反応データを作成した。

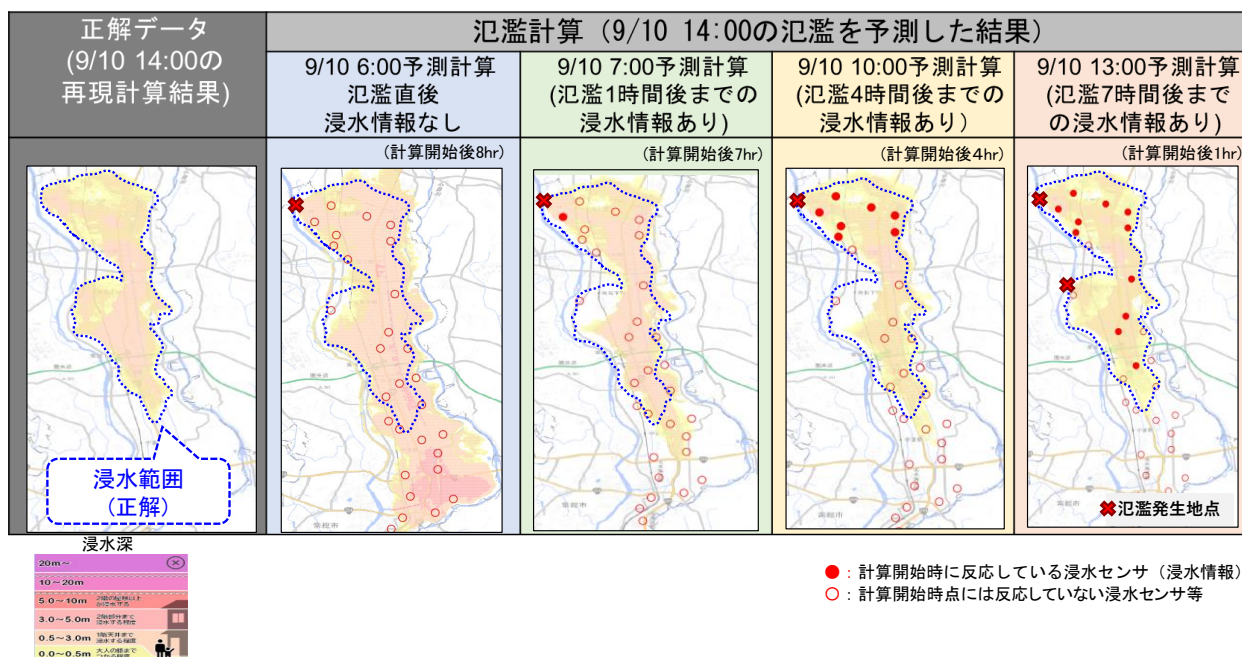


図-4 正解データと予測結果の比較結果 (9/10 14:00の氾濫を予測した結果)

c) DMDモデルの構築

想定最大規模相当の氾濫流量を与えた氾濫シミュレーションにより浸水深時系列データを作成した。作成した浸水深時系列データに対してDMDを適用し、モード抽出を行った。

d) 検証方法

c)で構築したDMDモデルによる氾濫解析に対して、b)の浸水センサの反応データを用いて補正計算を実施した。計算結果と正解データとの比較を行うことで再現精度の検証を行った。

(2) 検証結果

図-4に2015年関東・東北豪雨の常総市周辺を対象とした試算結果について氾濫発生8時間後の9/10 14:00の氾濫を予測した結果を計算開始時刻ごとに示す。なお、試算結果の一覧を図-5に示す。

図-4より、氾濫直後の9/10 6:00時点の予測計算では補正に使用できる浸水センサの反応データがないため予測結果は正解データに対して乖離があるが、氾濫発生1時間後の9/10 7:00時点、氾濫発生4時間後の9/10 10:00時点、氾濫発生7時間後の9/10 13:00時点と補正に使用できるデータが増加するにつれ正解データに対して氾濫範囲の再現性が高くなることが確認できる。これより、適宜浸水情報に基づく氾濫予測結果の補正を適正に行えているといえる。

このように、本手法を用いることで氾濫原より得られた浸水情報に基づき氾濫予測結果の補正が可能となり、その結果、より実態に近い浸水状況を再現しつつ氾濫予測が可能となることが確認された。

7. まとめ

SIP 第3期において実施している氾濫予測システムの研究概要と現在の進捗状況について報告した。

DMDによる氾濫計算の高速化を検討し、DMDを氾濫解析に適用することで従来の物理モデルより100倍程度速く計算することが可能になり、補正計算を含めた氾濫予測計算をリアルタイムで実現の可能性があることを示した。

また、2015年関東・東北豪雨における常総市周辺を対象にDMDによる氾濫解析の高速化と浸水センサによる氾濫解析の補正手法を組み合わせた計算手法を適用したプロトタイプによる試算を実施した。その結果、現地浸水情報に基づき補正することで、より実態に近い浸水状況を再現しつつ氾濫予測が可能となることが確認された。

本研究で開発するシステムは、堤防決壊による氾濫発生時に氾濫予測情報を伝えることにより、避難の遅れによる被災を防止するなど、的確な防災活動や避難行動に寄与すると考えている。

謝辞：本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第3期「スマート防災ネットワークの構築」JPJ012289(研究推進法人：国立研究開発法人 防災科学技術研究所)によって実施されました。この課題の採択と助成に深く感謝いたします。また、本研究開発にご支援いただいております中央大学山田正研究室、北海道大学山田朋人研究室に心より御礼申し上げます。

参考文献

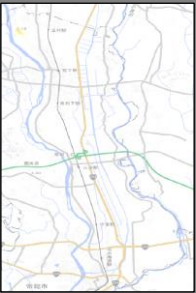
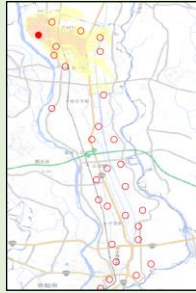
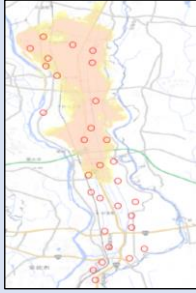
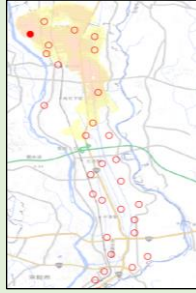
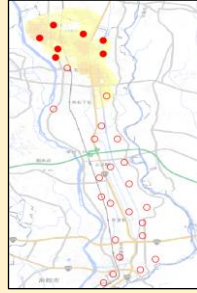
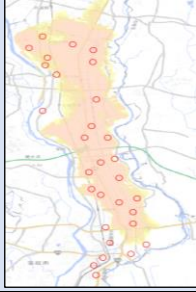
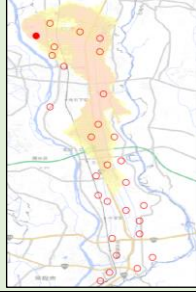
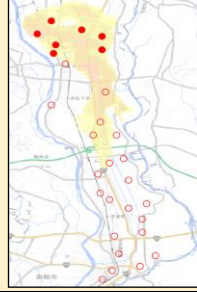
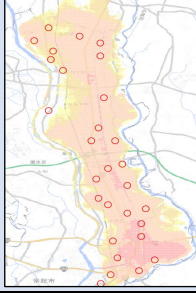
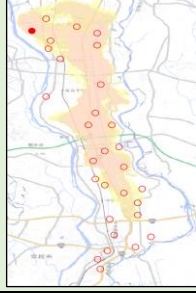
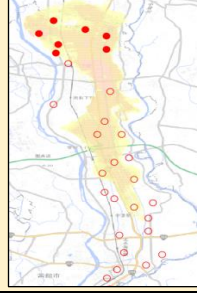
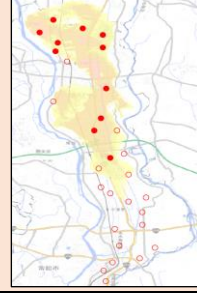
- 1) 国土交通省：平成30年7月豪雨災害での水災害・土砂災害情報の活用状況ふりかえり，2018.10.
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hazard_risk/dai01kai/dai01kai_siryoku2-2.pdf
- 2) 千曲川・犀川大規模氾濫に関する減災対策協議会：第6回（R2.06.11(木)Web会議）資料，2020.6.
<https://www.hrr.mlit.go.jp/chikuma/bousai/gensai/siryoku/6/4-1.pdf>
- 3) 国土交通省：「平成27年9月関東・東北豪雨」に係る洪水被害及び復旧状況について，2017.4.
https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000687586.pdf
- 4) NHK放送文化研究所：放送研究と調査（2016）第66巻第8号，2016.8.
https://www.nhk.or.jp/bunken/research/domestic/pdf/20160801_6.pdf
- 5) 佐山敬洋：鬼怒川氾濫による常総市周辺の浸水被害に関する研究・調査報告，2016年度 河川技術に関するシンポジウム 研究・調査報告，2016.6.
https://committees.jsce.or.jp/hydraulic01/system/files/05%20OS1sayama_0.pdf
- 6) 国土交通省：ワンコイン浸水センサ実証実験，
<https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/wankoinsensa/index.html>，2024年11月閲覧。
- 7) 内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム（SIP：エスアイピー），
<https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/index.html> 2024年11月閲覧。
- 8) 国立研究開発法人防災科学研究所：サブ課題Bリスク情報による防災行動の促進 | スマート防災ネットワークの構築，
<https://www.nied-sip3.bosai.go.jp/research/detail-b.html>，2024年11月閲覧。
- 9) 佐山敬洋，賽馨：リアルタイム浸水ハザードマッピングのための現地浸水情報同化技術，土木学会論文集B1（水工学）Vol.74, No.4, pp.1297-1302, 2018.[Sayama, T. and Takara, K.:A data assimilation technique for real-time inundation mapping with local flood information, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1(Hydraulic Engineering), Vol.74, No.4, pp.1297-1302, 2018.]
- 10) 佐山敬洋，小林亮祐，賽馨：現地情報の同化による浸水深分布の推定-平成27年9月鬼怒川洪水を対象にした検証-，土木学会論文集B1（水工学）Vol.74, No.5, pp.1507-1512, 2018. [Sayama, T. Kobayashi, R. Takara, K.:Estimation of inundation depth distributions by assimilating local flood information -validation for the kinu river flood case in September 2015-, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1(Hydraulic Engineering), Vol.74, No.5, pp.1507-1512, 2018.]
- 11) 伊藤裕之：浸水解析におけるアドジョイント法の適用性に関する検討，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.68, No.2, pp.625- 635, 2012.[Ito, H.:Study on applicability of adjoint method to inundation analysis, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics), Vol.68, No.2, pp.625- 635, 2012.]
- 12) 久保英二郎，勝原亮介，船橋昇治，田中耕司，中安正晃，朝堀泰明，小山直紀，池内幸司，山田正：浸水センサの反応順序に着目した破堤・越水箇所の特性手法に関する研究，河川技術論文集，第30巻，2024.6, [Eijiro, K., Ryosuke, K., Shoji, F., Koji, T., Masaaki, N., Yasuaki, A., Naoki, N., Koji, I., Tadashi YAMADA Y and YAMADA, T.:A Proposal for an ultra-fast flood analysis method using dynamic mode decomposition, Advances in River Engineering, JSCE, Vol.30 2024.]
- 13) 小山直紀，山田朋人，山田正：動的モード分解を用いた超高速氾濫解析手法の提案，河川技術論文集，第30巻，2024.6，[KOYAMA, N. YAMADA, T. and YAMADA, T.:A Proposal for an ultra-fast flood analysis method using dynamic mode decomposition, Advances in River Engineering, JSCE, Vol.30, pp.459-464, 2024.]

DEVELOPMENT OF REALTIME FLOOD FORECASTING SYSTEM UTILIZING FLOOD INUNDATION INFORMATION

Ryosuke KATSUHARA, Shoji FUNABASHI, Eijiro KUBO, Chaochao QIAN,
Yasuaki ASAHORI and Koji IKEUCHI

This study aims to develop a prototype system that rapidly provides flood inundation area predictions after flooding events from rivers, using flood information obtained from floodplains. This paper reports on the research overview and policy of the real-time flood forecasting system, which is being developed by FRICS as part of the "Strategic Innovation Promotion Program (SIP) Phase 3".

A prototype computational method was developed by combining Dynamic-Mode-Decomposition with the optimization method based on inundation sensors. From the results of the verification calculations, it was suggested that the accuracy of the flood prediction will be improved by applying the optimization method based on inundation sensors.

予測対象時刻	正解データ (再現計算結果)	計算開始時刻別 予測結果			
		2015/9/10 6:00 氾濫直後 補正データなし	2015/9/10 7:00 (氾濫1時間後までの 浸水情報)	2015/9/10 10:00 (氾濫4時間後から 予測)	2015/9/10 13:00 (氾濫7時間後から 予測)
2015/9/10 6:00 (氾濫直後)			予測開始前	予測開始前	予測開始前
2015/9/10 8:00				予測開始前	予測開始前
2015/9/10 10:00					予測開始前
2015/9/10 12:00					予測開始前
2015/9/10 14:00					

浸水深



●：予測開始時に反応している浸水センサ

○：予測開始時点には反応していない浸水センサ

図-5 試算結果の一覧