# 内水氾濫リアルタイム解析法の構築と 避難・減災まちづくりへの活用

福岡 龍1・福岡 捷二2

<sup>1</sup>正会員 国土交通省 近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 流域治水課 (〒620-0875 京都府福知山市字堀小字今岡2459-14) E-mail: fukuoka-r86wz@mlit.go.jp

<sup>2</sup>フェロー 中央大学研究開発機構 機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27) E-mail: sfukuoka001t@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

2020 年 7 月豪雨における内水氾濫の検証データの殆どない人吉市を対象に,高精度な内水氾濫解析 (2D-IMEC)から教師データを得ることで,内水氾濫リアルタイム解析法(RIMEC)を構築した.過去の 複数豪雨への適用から内水氾濫のための新たな避難基準を見出し,内水・外水氾濫の重畳災害時の安全な 避難の考え方やリアルタイム内水氾濫予測への活用を示した.更に,2D-IMEC と RIMEC の解析結果とこ れに基づく流域水収支分布図を作成し,複数豪雨や対策前後で,地先の浸水状況,浸水量や流域貯留量の 変化を示すことで,地域の防災関係者等に流域治水を進める上での分かり易い考え方を提示した.

# *Key Words:* urban inundation, real-time inundation analysis, evacuation, community planning, basin water balance map (BWBM)

# 1. 序論

2020年7月豪雨時,熊本県人吉市では,球磨川等の外 水氾濫により全世帯の5分の1が浸水し,21名(関連死 1名を含む)に上る甚大な人的被害が生じた.田端ら<sup>1)</sup> は,球磨川本支川一体での洪水流・氾濫解析から,洪水 の流下・氾濫機構や被災要因等,外水氾濫の実態を解明 した.そして,人吉市において,7月4日6時00分頃に 球磨川本川とその背水を受けた山田川,6時30分には万 江川から外水氾濫が生じ,市内の道路を氾濫流が流速 Im/s程で流下したことを示した.福岡ら<sup>2</sup>は,同洪水時 の人吉市の氾濫流に関して,高精度な内水氾濫解析を行 い,外水氾濫発生前の内水氾濫によって避難困難な浸水 状況になったことを示し,内水氾濫と外水氾濫の重なる 災害となった人吉市において,内水氾濫の初期段階での 避難とこれを支える予測技術が必要であることを強調し た.

流域治水では、各流域の地勢や治水課題に応じて、河 道で如何に洪水を安全に流下させるか、集水域でどのよ うに雨水を貯留・遊水させるか、氾濫に対してどの様に 備えるか等について防災関係者や地域関係者が協働して 対応することになる.そこでは、流域の降雨流出・洪水 流下・氾濫形態等の洪水現象を分かり易く説明し、流域

協働の考え方を共有する技術が必要不可欠である. これ に対し、福岡 344は、鬼怒川や球磨川の検討を基に、観 測水面形に基づく洪水流・氾濫解析から, ダム群・河 道・氾濫域等の流域全体の水収支分布を得ることによっ て、各流域での適切な水量バランスを検討することが流 域治水の基本であることを示した. また, 豪雨時にいつ, どこで、どれくらい量の水がどの様な状態で分布するか、 どれ程の水量が河道を流下したか等、流域全体の降雨流 出から洪水流下・氾濫の過程における水動態を分かりや すく説明できる流域水収支分布図は流域治水の核となる 技術であることを強調した. 更に, 見上ら <sup>9</sup>, 石井ら <sup>9</sup> は、規模の異なる本支川流域で流域水収支分布図を作成 し、その意義と重要性を示している.本川流域・支川流 域・市街地内水域等の多層的な流域スケールがある中で, 本支川流域での水収支分布図は検討されているが、市街 地の水収支分布図の検討は遅れている. 市街地内水域に おいても、雨水がどこからどのように集まってきてどの ような氾濫を起こしているかを一つの小流域での流域治 水問題として捉えることが重要である. 2020年7月の豪 雨災害を含め、近年の内水氾濫の高頻度化や内水氾濫と 外水氾濫の重畳災害の及ぼす被害の大きさを考えると, 市街地内水域における雨水動態を丁寧に追跡し、内水氾 濫の因果や各避難路で生ずる内水氾濫による浸水状況を



図-1 対象地域の概要

説明可能な内水氾濫解析モデルとこれに基づく市街地の 水収支分布図を作成し,住民の避難計画や減災まちづく りに活かすことは流域治水における喫緊の課題である.

市街地の氾濫解析手法に関しては、これまで多くの研 究が行われてきた.福岡ら<sup>つ</sup>は、密集市街地における道 路網のモデル化や水理実験に基づく家屋抵抗の表現式の 導入により、氾濫流挙動等を高精度に解析可能な二次元 モデルを構築し、これを用いた氾濫を想定した総合的な 被害軽減策の考え方を示した.また、内水氾濫に関して、 関根<sup>®</sup>は、住宅地の屋根に降った雨水が下水道へ流出す る過程、河川や下水道、道路上の雨水・氾濫水の流れと それらの相互の流出入の過程を力学原理に基づき、精緻 に解析する街路ネットワーク浸水・氾濫解析モデルを構 築し、東京都心部における浸水・氾濫事例を再現した.

また、関根ら<sup>9</sup>は、このモデルを用いて、高解像度の X バンド MP レーダーの降雨量データを入力値としたリア ルタイム浸水・氾濫予報が可能となることを示した. 佐 貫ら<sup>10</sup>は都市沿岸部における河川、下水道、海岸などの 様々な氾濫因子を考慮した統合氾濫予測モデル(シーム レスモデル)を構築し、鶴見川流域への適用からリアル タイム氾濫予測への有用性を示した. 一方、人吉市のよ うな農村の一部が市街化された地域は、下水道整備も途 上であり、かつ市街地内を流れる水路網の流下能力も低 いために内水氾濫リスクが高く、加えて球磨川等の氾濫 も近年発生していることから内水氾濫・外水氾濫リスク の高い地域となる. このような内水氾濫・外水氾濫リス クが高い地域における内水氾濫解析・予測技術やこれを 図-2 2020年7月豪雨の時空間分布 (外水氾濫発生前の4日5時まで)

用いた被害軽減方策の検討等に関する定量的な調査・研 究は少ない.

これらを踏まえ、本研究は2つの構成から成る.第一 は、高精度な内水氾濫解析(2D Inundation Model for Evacuation and Community planning: 2D-IMEC) からリアル タイム内水氾濫解析法の構築に向けた教師データを得る. ここでは、教師データとなる 2020 年 7 月豪雨時の 2D-IMEC の結果を、著者らのこれまでの検討 <sup>3</sup>を含めて示 す. なお, 2020年7月豪雨災害では、内水氾濫に引き続 く球磨川等の外水氾濫が発生したこと、さらに内水氾濫 の発生時刻が真夜中であったことから内水氾濫実績、実 態を示す映像・写真、水路網の水位データ等の検証デー タを得ることが困難な状況であった.本研究では、詳細 に主要な水路網や宅地地盤高等の地形情報および降雨情 報を取り入れた解析を行うことで実態解明を行った. こ の 2D-IMEC の解析結果に基づき,国土交通省九州地方 整備局・熊本県・人吉市との協議や現地調査、地元の内 水氾濫の証言との比較等を重ね、当時の内水氾濫の確認 し得る全ての情報と照らし合わせた上で実態をより説明 できる内水氾濫解析モデルを構築し、解析精度の向上に 努めた. そして、2D-IMECで得た教師データを基に内水 氾濫リアルタイム解析法 (Real-time Inundation Model for Evacuation and Community planning: RIMEC)を構築し、今 後の内水・外水氾濫の重畳災害を想定した住民の安全な 避難への活用を示す. 第二は、2D-IMEC・RIMECの氾濫 解析と、これに基づく流域水収支分布図を合わせた検討 から、各流域・地域における防災計画やまちづくり計画

2

#### 2. 高精度な内水氾濫解析法(2D-IMEC)の構築<sup>2)</sup>

#### (1) 対象地域と2020年7月豪雨の特徴

本研究では、2020年7月豪雨時に球磨川や万江川等の 外水氾濫により甚大な被害が生じた図-1の赤い破線で示 す約 10km<sup>2</sup>の人吉市街地を対象とする.人吉市街地を含 む人吉盆地は、かつての人吉湖跡に位置するため、周辺 山地から急峻な勾配で雨水が集水される. このため、市 街地の地形勾配も 1/150 程度と急峻である.また、南西 部の万江川合流点付近は最も標高が低く、旧河道に沿っ て雨水が集水されやすい特性を有している. 排水系とし ては、都市域のような地下の下水道施設や下水道網によ る排水機構とは異なり、図-1の空色で示す幅 4m 程の御 溝川や出水川, 農業用排水路等の既存施設を活用しなが ら球磨川等へ排水する構造となっている. この水路網か ら成る低地の内水氾濫は高頻度で発生する地域課題であ り、被害を減らすため、現在は二次放水路の建設が進め られている. 図-2 は、2020年7月豪雨時の人吉市街地に おける外水氾濫発生前の豪雨の時空間分布を示している. 人吉市街地では外水氾濫の発生前に 60mmh を超える高 強度豪雨が襲った.また、肥薩線北部の丘陵地等では、 南部市街地に比べて 70mm 程多くの豪雨が短時間で生じ た. このため、10km<sup>2</sup>の小流域であっても豪雨の時空間 分布を考慮することは重要である.

#### (2) 基礎方程式と解析条件

本解析では、丘陵地や村山台地の降雨流出、水路網の 流れ、氾濫について式(1)、式(2)を一般座標系に変換し た平面二次元不定流解析を全流域に適用する.また、村 山台地や丘陵地、平野部の地下浸透や浸透流は考慮せず、 表面流のみを考慮する.洪水立ち上がりやピーク流量、 ピーク時間等の再現性に一定の課題はあるが、山地・市 街地地形や豪雨情報を丁寧に反映することで、どのよう な雨水の流下・集水過程を経て内水氾濫が生じたのか等 の内水氾濫実態の説明は可能であると考えた.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_j h}{\partial x_i} = r_k \tag{1}$$

$$\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{\tau_{bi}}{\rho}$$
(2)

ここでは、 $i, j: 1, 2, k: 1 \sim 25, x_i: x, y, h: 水深,$   $t: 時間, U_i: x_i 方向の水深平均流速, r_k: 領域k内の$  $雨量, g: 重力加速度, <math>z_s: 基準面からの水位, \tau_{bi}:$  $x_i$ 軸方向の底面せん断力,  $\rho: 水の密度を表している.$ 



図-3 市街地・地形モデル



図-4 2D-IMECのフローチャート

粗度係数は、台地と丘陵地を 0.06、それ以外の水路や 道路等については一様に 0.03 を与えた.降雨については、 式(1)のr<sub>k</sub>で加えており、図-2の気象業務支援センター のレーダー解析雨量(1km 間隔 30 分毎)データを用い て、市街地を 25 区域に分割し、降雨の時空間分布を考 慮した.また、本モデルでは建物地形を標高データとし て取り入れている.このため、建物上に降雨を与えると、 建物と道路の境界で不連続場を解析することとなり、解 析が不安定になった.そこで、DEM データ(5m 間隔) と L.P.オリジナルデータ(0.3m 間隔)の標高の差から建物を特定し、建物部に降雨を与えずに建物面積分の降雨 量をそれ以外の箇所に上乗せする工夫を行った.各水路 の下流端には池を設け、田端ら<sup>10</sup>の球磨川本支川一体で の洪水流解析から得られた外水位を与えた.また、内・ 外水位がゲート開度を超えた場合には、ゲートの算定式 を基に樋門・樋管からの流出入を考慮した.更に、福川 排水樋管・出水川排水樋管については、提供資料を基に 開閉操作を考慮した(図-1).

#### (3) 市街地・地形モデル

雨水の集水過程や氾濫流の流下過程等の内水氾濫現象 は、地形場の影響を大きく受ける.このため、市街地地 形を如何に精度よく取り入れるかは内水氾濫機構を明ら かにするうえで、特に重要となる、市内を流れる水路網、 道路網、住宅群、更には台地や丘陵地等の市街地地形を 高精度に解析に取り入れるために、L.P.オリジナルデー タや河道の横断面データ、国土地理院の公開する DEM データを基に平面的に 2m の解析格子を用いて市街地・ 地形モデルを作成した. 解析格子サイズを 2m とした理 由は、市内を流れる幅 4m 程の水路の流れや道路上の雨 水の流れを高精度に解析するためである. この幅以下の 水路や下水道については、河川との接続が不明であるこ とや高強度降雨下においては本解析で扱う水路網の内水 氾濫が支配的となることから考慮していない. 具体的な 作成方法としては、先ず2mの解析格子内に含まれるLP. オリジナルデータの標高値の平均から市街地全体の地形 モデルを作成する.次に、図-1の空色で着色している水 路の標高を最深河床となるように設定する. 丘陵地や台 地においては、LP.オリジナルデータでは樹木高を与え てしまうため, DEM データの標高値を与えることで, 地表面形状を再現する.また、村山台地上のため池は御 溝川と合流する鷹木川の源流であるため、<br />
適切に流出過 程を扱う必要がある. そこで, ため池台帳を基にため池 の地形形状を取り込み、初期水位は常時満水位とした. また、降雨が集水され、ため池水位が洪水吐高さを越え ると接続される鷹木川へ雨水を自然排水する条件とした. これらによって、市街地・地形モデルを図-3のように作

以上, (1)~(3)をまとめた 2D-IMEC の全体像を図-4 に 示す.

# 3. 2020 年 7 月豪雨時の人吉市における内水氾濫 機構と水収支分布の分析<sup>2)</sup>

# (1) 市街地の内水氾濫機構

成した.

ここでは図-1に示す対象地域の内水氾濫機構に着目す



図-5 2020年7月豪雨時の人吉市街地の雨水の流れ

る. 図-5は、人吉市街地全体の雨水の流下過程を標高コ ンターに解析で得た表面流(空色)を重ねることで示し ている. ここでの表面流は,水深 5cm 以上,流速 0.1m/s 以上で流れる雨水を指している. 肥薩線北部に位置する 丘陵地や台地、水田地帯から多くの雨水が地形に沿って 流下していることが分かる.山江川や鷹木川等の丘陵地 や台地から流れ出る支流は、市街地を縦横に流れる御溝 川と合流する.内水氾濫の発生前の3日21時頃に、御 溝川を流れる流量は 2m3/s 程であった. これに対し,豪 雨ピーク時に山江川から 15m3/s 程, 鷹木川から 5m3/s 程 の流量が御溝川へ流れ込むことで、御溝川の流量が増大 した.そして、図-6に示すように4日3時には御溝川沿 川の瓦屋町で、御溝川からの氾濫流が沿川道路を水深 1m, 流速 1m/s 程度で流下し, 道路一帯が歩行避難の困 難な浸水状況に至った. また, 瓦屋町では 2006 年豪雨 時に図-7の写真で示すように御溝川で氾濫が生じており、 2006年豪雨に対して同条件で行った解析では、この区間 の氾濫を再現することができている.

南部市街地に位置する下薩摩瀬町周辺では、御溝川・ 福川ともに水路幅が狭く、流下能力が低い.このため、 両水路から氾濫が生じ、図-8で示すように、水路周辺で は多くの道路が冠水した.特に、避難所となる人吉スポ ーツパレスに向かう幹線避難路 A~D 点は、周辺地盤に 比べ道路高が低く、雨水や氾濫水が集水されやすい地形 特性を有する.このため、豪雨の増大とともに、図-9、



下薩摩瀬町の水深・流速分布

図-10のように水位が急激に上昇し,道路上を水深 lm, 流速 lm/s 以上の氾濫流が流下した.この道路では,内 水氾濫によって通行が困難であったことが,地区懇談会 や地元の意見として挙げられていた<sup>注1)</sup>.なお,図-9,図 -10の RIMEC の結果については,4章で言及する.

南西部を流れる出水川では、図-5に示すように地形に 沿って北部の水田地帯から多くの雨水が流れ込む.4日 0時頃になると水田水位が畦畔高を超えて流出し、その 下流の出水川水位は4日0時30分頃から急激に上昇した.そして、4日3時には出水川沿いの下林町においても同様に道路冠水が生ずる解析結果となった.また、出水川の最下流の温泉町では、4日1時になると排水樋管の閉操作が行われ、その背水の影響によって、徐々に浸水範囲が広がる解析結果を得た.なお、下薩摩瀬町や温泉町等においては、実際に住民の逃げ遅れが発生し、外水氾濫が生じている中で消防隊による懸命な救助活動が

図-10 幹線避難路 (C点) の浸水位の時間変化



図-11 外水氾濫発生前(4日3時)の人吉市街地の浸水状況



図-12 4日7時30分の内水氾濫と外水氾濫 いによる浸水状況

行われていたことが記録されている注2).

最後に、外水氾濫発生前の4日3時における人吉市街 地全体の浸水状況を図-11に示す.2020年7月豪雨では、 人吉市街地の北部への豪雨の集中により、村山台地や丘 陵地、北部水田地帯から多くの雨水が市街地を流れる水 路へ流入することで、外水氾濫の発生より早い4日の3 時には、市街地の至る所で内水氾濫が生じ、避難困難な 状況となっていた.また、3日23時に球磨川より南側の 山沿い地域に避難勧告、4日4時に市内全域に避難勧告、 4日5時15分に市内全域に避難指示が発令されており、 避難情報の発令より前の時間帯で内水氾濫は生じていた. そして,図-12に示すように内水氾濫で移動困難な浸水 状況の中に,球磨川や万江川,山田川の氾濫流が流れ込 むことによって甚大な人的被害が生じた.このため,内 水氾濫と外水氾濫が重なるような場合には,内水氾濫の 初期段階に住民の避難を如何に安全に行うかが第一に重 要となる.この住民避難を支える内水氾濫予測技術の開 発は喫緊の課題となる.



図-13 市街地における水収支分布図の作成フローチャート

# (2) 市街地の流域水収支分布図を用いた 2020 年 7 月豪雨時の内水災害の見える化

ここでは、2D-IMECの結果に基づいて、市街地域の水 収支分布図を構築し、2020年7月豪雨の内水災害の全容 を示す. 図-13 に市街地水収支分布図の作成フローチャ ートを示す. 流域水収支分布図を作成する上では, 各時 刻,各地点の流速・水深等の水理量を氾濫解析から図-11 のように得ることが前提にある.そして、氾濫解析 から得た各地点の流入と流出流量の差から各時間の貯留 率を算出し、これを時間積分することで貯留量の時間変 化を得る. 流域内の土地利用毎に貯留量を積分し、豪雨 時の時空間的な貯留量分布を算出する、これらをまとめ ると、流域全体の時空間的な水収支分布は、式(3)のよ うに表現される. 流域内に降った総降雨量と総排水量の 差は、流域内の貯留量と一致し、この時空間的な貯留量 分布を把握することで豪雨時にいつ、どこで、どれくら いの量の水がどのような状態で存在しているのかを求め ることができ、内水災害の全容を見える化することが可 能となる.更に、浸水量の内訳として、各町の浸水量分 布も合わせて算出することによって、内水氾濫の高浸水 リスク地点や対策優先箇所を明らかにすることが可能と なる.

$$\frac{dS_{plateau}}{dt} + \frac{dS_{paddyfield}}{dt} + \frac{dS_{river}}{dt} + \frac{dS_{inundation}}{dt}$$
$$= \frac{1}{3.6} \cdot A \cdot R - Q_{out} \tag{3}$$

ここでは、*Splateau*:各時間で丘陵地や台地に存在する 水量,*Spaddyfield*:各時間で水田に存在する水量, *Sriver*:各時間で水路網に存在する水量,*Sinundation*:各 時間で道路や宅地等において豪雨による湛水あるいは、 水路網の氾濫により浸水している水量,*A*:流域面積 (km<sup>2</sup>),*R*:流域平均雨量(mm/h),*Qout*各水路からの流域 外への排水流量(m<sup>3</sup>/s)を表している.

図-14 に,2020年7月豪雨時の球磨川や万江川,山田 川の外水氾濫発生前の人吉市街地における内水氾濫時の 流域水収支分布図を示す.緑・黄緑色で台地や丘陵地,



図-14 2020年7月豪雨時の人吉市街地における内水氾濫時の水収支分布図(外水氾濫発生前の4日5時まで)

水田の貯留量、赤色で低地の浸水量、青色で水路網の貯 留量を表している. 4日5時までの総降雨量約270万m<sup>3</sup> に対し、樋門や樋管からの総排水量は68万m<sup>3</sup>となって おり、総降雨量の約70%が人吉流域内に存在している. 2020年7月豪雨時には、降雨強度の増大に伴い、低地の 浸水量が急激に増加している.低地の浸水量は最大で 139 万 m<sup>3</sup>に達し、総降雨量の 50%を占める. 更に、図-14 では、水収支分布図に 19 の町の浸水量分布を反映さ せている.一例として、御溝川や出水沿川の瓦屋町や下 林町の浸水量の時間変化を強調しており、これら水路網 沿川の低地地域では地域の中でも特に浸水量が増大した. これらより、2020年7月豪雨時の人吉市街地では、豪雨 の集中により浸水量が急激に上昇したことで避難時間が 短く大きな問題が生じたことが分かった。また、内水問 題解決のためには、水収支分布図の緑や黄緑色で示す上 流域の貯留量を増加させることや市街地の上流区間での 分流によって、下流の低地に到達する洪水流量を低減さ せることやピークの発生を遅らせることが重要であり, この被害軽減に向けた検討は6章で詳しく述べる.

以上より、2D-IMECを用いて2020年7月豪雨時の人吉市の浸水機構や水収支分布等の内水氾濫の実態を明らかにするとともに、次章のリアルタイム予測技術の構築に向けた教師データを得た.

# 4. 内水氾濫リアルタイム解析法(RIMEC)の構築

3章の 2D-IMEC を用いた 2020 年 7 月豪雨時の検討か ら、内水・外水氾濫の重畳災害時の避難と内水氾濫予測 技術について検討する必要性を示した.しかし,2D-IMECの解析は2020年7月豪雨の約1日程度の解析に1 週間を要してしまい、リアルタイム予測技術への適用に は課題があった.本章では、3章で示した2D-IMECの結 果を教師データとして新たに構築した内水氾濫リアルタ イム解析法(RIMEC)とその活用について述べる.な お、人吉市街地では水路網等に水位計が十分に設置され ておらず、更にその後に発生した外水氾濫によって内水 氾濫の痕跡が消えてしまったために、内水氾濫の検証デ ータが乏しいことから、それに代替する教師データを 2D-IMECから得ることで解析の高速化を図る.

# (1) 本研究のリアルタイム解析の定義と高速化の工夫

一般的なリアルタイム氾濫解析や氾濫予測は、予報豪 雨や現在降っている豪雨の時々刻々の降雨データを入力 値として、現在・数分後・数時間後にかけての河道の流 下状況,浸水状況等を予測することが考えられている. 内水氾濫は、外力となる降雨の時空間分布の影響を大き く受けるため、降雨予測の精度に課題がある現段階にお いては、実際に起きた豪雨から地域の浸水特性や安全な 住民の避難時間を検討することが第一に重要である.本 研究では、過去の複数豪雨に RIMEC を適用し、市街地 の降雨量と内水氾濫発生の関係を見出すことで、予測・ 実況の豪雨状況から避難時間や浸水状況を推定する.ま た、過去豪雨の検討から、どれ程前までに内水氾濫の浸 水状況を把握する必要があるのかを学び、この避難時間 を考慮したリアルタイム浸水予測解析を合わせて実施す る. そして、過去豪雨と予測豪雨の両者の RIMEC の解 析結果を基に、避難の必要性や避難時間を市町村等が総 合的に判断し,避難情報の発令等に生かすことを狙いと する. 多数豪雨の解析や予測解析に対して,3章で示し た 2D-IMEC では解析に時間がかかりすぎてしまうこと から,市街地の内水氾濫機構について 2D-IMEC と同等 の結果を,実時間スケールの解析時間で得ることが可能 な内水氾濫解析モデルを構築することが重要になる.

RIMEC の構築に向けて、解析の高速化を検討する. 図-15 に、2D-IMEC 解析から得られた水深分布や氾濫流 速,水収支分布等を教師データとして高速化する RIMEC構築の全体像を示す. 高速化のポイントは2つあ り、第一は丘陵地や台地の降雨流出量の算定にタンクモ デル11)を分布させたモデルを適用すること、第二は低平 地での解析格子サイズの拡大であり,解析を簡易化する だけでなく、内水氾濫の実態に沿った高速化を行う. そ の他の条件は、2D-IMEC と同様の手法・条件で解析を行 う. 2D-IMEC では、丘陵地や台地の地形場を高精度に 再現し、平面二次元不定流解析により雨水の集水・流下 過程を解析してきた. 図-16, 図-17 は, 丘陵地と台地の 標高コンターに 2D-IMEC より得られる表面流を重ねて おり、この表面流の流向を基に赤の破線で示す小流域群 に分割する. そして, 各小流域の流出流量ハイドログラ フを説明可能なタンクモデルのパラメータを設定し、流 出量を算定する. 図-18 は本解析で用いた 3 段タンクモ デルの概略図とパラメータを示しており、各タンクの名 称は吉野ら 四を参考とした. なお、このパラメータは、 小流域毎に流出量を説明可能な値を検討し、その平均値 を求めることで丘陵地・台地それぞれ一律に設定した. これは、同じような土質や地形的特徴を有する流域を小 流域に分割していることから、流域特性を反映したパラ メータは同じ値を用いることが適切であると考えたため である.また、小流域ごとに合わせたパラメータとそれ らを丘陵地・台地ごとに平均化したパラメータを使用し た際の流出量に大きな差はなく, パラメータを複数設定 し、解析モデルを複雑化することは今後の実用において も適切でないと考え、平均値を用いている. そして、図 -19 に示すように 2020 年 7 月豪雨時の丘陵地・台地から の流出量を再現した. 各小流域からの流出量は境界条件 として、2D-IMECで得た水脈を参考に丘陵地や台地のそ れぞれの流出点で与える. また, このタンクモデルパラ メータは、2006年7月豪雨にも適用し、2020年7月豪雨 と同様に 2D-IMEC と同等の結果になることを確認した. 次に,解析格子サイズについて述べる.人吉市街地の場 合には、平面的に2mから4mへと4倍に格子サイズを拡 大した. ここでは、市街地を流れる水路網の幅が 4m 程 あるため、4mとしている. そして、図-20に示すように、 2D-IMECと同様に水路網・道路網・住宅群を解析の標高 データとして与えた.一方で、雨水の集水過程や氾濫流 の流下過程は市街地地形の影響を強く受けるため、解析





図-16 2D-IMECの結果に基づく丘陵地の小流域分割



図-17 2D-IMECの結果に基づく村山台地の小流域分割

土木学会論文集, Vol. 81, No. 6, 24-00128, 2025.



図-19 2020年7月豪雨時の丘陵地や台地のタンクモデル流量の算定



図-21 RIMECに基づく流域水収支分布図

格子サイズの拡大に伴う氾濫流況の変化によって,避難 路上の浸水位の立ち上がりが再現できないという問題が 生じた.格子サイズを変更したことで道路標高が正しく 評価できていない箇所は,2D-IMECで得た雨水の流れを 再現できるように道路高を再設定した.

#### (2) 2020年7月豪雨への適用と検証

ここから, RIMEC を 2020 年 7 月豪雨に適用し, 解析 時間や精度の検証を行う. 図-9, 図-10 に 2020 年 7 月豪 雨時に大きな浸水深・流速が生じた避難所周辺の幹線避 難路(A~D 点)の RIMEC の解析結果を示す. 冠水水面形 の時間変化や浸水位の立ち上がりを概ね再現することが 出来た. 各水路の水面形や市街地全体の浸水状況の時間 変化,氾濫流速等についても 2D-IMEC と同様の結果と なった.また,2020年7月豪雨の約1日程度の解析にこ れまで1週間要していたが,RIMEC では19時間程に短 縮され実時間程度で解析することができ,今後のリアル タイム予測へ活用が可能となった.なお,実際の予測解 析を行う上では,波形全体を解析するのではなく,豪雨 立ち上がりの数時間を想定しており,予測豪雨に対して 十分なリアルタイム性のある解析を行うことが可能であ る.更に,図-21は,RIMECを用いた2020年7月豪雨時 の人吉市街地における水収支分布図を示しており,2D-IMEC と同様の結果を得ていることから,住民避難に加 えて内水氾濫の被害軽減に向けても活用可能なモデルで あることが示された.なお,低地浸水量全体としては,



4日0時以降で2D-IMECよりRIMECが小さな値となっ ているが、図-10に示すように4日0時の段階で避難路 は水深0.5m程となり、避難困難な状態となる.主とし て、この時刻より前を想定する内水氾濫時の避難基準等 の検討には大きな影響はないものと考える.

以上より、2D-IMECの結果を教師データとした解析の 高速化によって、高精度かつリアルタイム(実時間程度) で解析可能な RIMEC を構築した.

#### 5. RIMECの住民避難への活用

本章では、4章で構築した RIMEC を人吉市街地における主要豪雨に適用し、住民避難への活用を示す.

#### (1) 検討豪雨の特徴

検討豪雨は、2020年7月豪雨に加え、人吉雨量観測所 で24時間雨量が多い上位6つ(2006年以降:気象業務 支援センターのレーダー解析雨量 1km 間隔のデータが整備されているのが 2006年以降であるため)の計7豪雨とした.図-22~図-24 は、対象豪雨の時空間分布を示している.なお、総降雨量に応じて、累加雨量コンターの表示範囲を変えている.2020年7月豪雨では丘陵地に、2006年豪雨では村山台地に、2018年豪雨では南部市街地に豪雨が集中しており、10km<sup>2</sup>の市街地内においても豪雨毎に降雨の集中箇所が異なることが分かる.また、甚大な被害が生じた 2020年7月豪雨は、降雨強度や降雨継続時間に対する総降雨量が大きいため、特に危険な豪雨であったことが分かる.

#### (2) 住民避難への活用

人吉市での住民避難に関する研究は多くあるが<sup>例えば 13</sup>, これらはアンケート調査等から住民の避難・被災実態を 分析し、今後の避難促進につなげることを狙いとしてい る.著者らは、人吉市で実際に起こった多数の豪雨イベ ントに RIMEC を適用し、避難の新たな指標を見出すこ



図-25 歩行避難の困難となる水深・流速の組み合わせ<sup>注3)</sup>



図-27 2019年豪雨時の避難困難箇所と累加雨量コンター

とで、 今後の住民の安全な避難や避難時間の確保、 これ らを支える内水氾濫予測に活かすことを考える. そこで、 図-25 注3)で示す歩行避難の困難となる水深・流速が生じ た場所とその時点の累加雨量との関係を分析した. ここ での累加雨量の算出には、流域平均雨量を用いている. 図-26~図-28は、2020年、2019年、2006年の3つの豪雨 事例の検討結果を示す.着色された箇所は、各豪雨で内 水氾濫によって歩行避難が困難となった場所を示してお り、赤色の箇所はより小さな累加雨量で歩行困難となっ た箇所を示している. 人吉市街地では, 地形特性のため, どの豪雨においても累加雨量 80mm 程度に達すると、人 吉スポーツパレスや村山台地等の避難所に向かうために 特に重要となる国道 445 号上等(図-26~図-28 の A~E 点)で移動困難な浸水状況となった.また、図-29は各 豪雨での国道 445 号 E 点上の浸水深と降雨の時間変化を

図-28 2006年豪雨時の避難困難箇所と累加雨量コンター

示しており, 黄色の帯は豪雨により急激に湛水深が上昇 し、歩行避難困難となる浸水深 0.5m まで達する時間を 示している. ここから, 避難時間は降雨強度によって異 なることが分かる.降雨強度 10mm 以下の場合には 8 時 間程,降雨強度 10mm/h~20mm/h 程の場合には 4 時間程, それ以上の強度の場合には2時間程で累加雨量80mm程 に達し、避難が困難となる浸水深 0.5m を超える浸水状 況に至る. これより、人吉市街地では降雨強度 10mm/h 以上の豪雨が継続する場合には、避難路が冠水する累加 雨量80mm程に達するまでの2~4時間程で内水氾濫時の 避難を行うことが重要であることが分かった.なお、地 上の雨水等の流下時間については、丘陵地等からの流出 量ハイドログラフとの比較及び避難路の集水過程を分析 し、着目した避難道路周辺に降った雨水が道路上の地形 的に低い箇所へ集水されることで湛水型の内水氾濫が生



じ、避難困難な浸水状況に至ることを確認した. このた め、雨水の流下時間は小さく、概ね降雨の累積量から必 要となる避難時間を設定することが可能であると考えた. 一方、内水氾濫のみの場合には、垂直避難で十分な 安全が確保できることが殆どである. RIMEC の検討結 果を実際の避難に活かすためには、流域での豪雨状況と 外水氾濫リスクの関係を分析し、内水氾濫と外水氾濫の 発生危険性を考慮した避難へつなげることが重要になる. そこで、近年の球磨川の主要な6つの洪水に対して、気 象業務支援センターの1km毎の解析データを用いて球磨 川人吉地点の上流域の流域平均雨量を求め、各豪雨での 累加雨量とその時刻における球磨川人吉地点の水位の応 答関係を分析し、豪雨時に球磨川上流域でどれ程の豪雨 が降った際に外水氾濫リスクが高まるかを検討した. 球 磨川上流域で累加雨量 200mm~300mm 程度の豪雨が生 じると球磨川水位が人吉市での避難の判断基準<sup>注 4</sup>であ る氾濫危険水位に達することが分かった.このことから、 球磨川上流域で 200mm~300mm 程度の豪雨が生じる場 合に, RIMEC の解析結果から得た内水氾濫の避難の判 断基準となる市街地の累加雨量や雨量強度,また予測解 析の結果を参考に内水氾濫を想定した住民避難を実施す ることが重要になる. これらを踏まえ, 2022年の台風14 号を例として住民避難への活用法を示す. 図-30 は、人 吉地点上流域の豪雨状況と人吉市街地豪雨状況, 球磨川 人吉地点の外水位を示しており、これまでの検討結果を 踏まえた避難のタイミングを記載している. 図-30 で示 すように球磨川人吉地点上流域で累加雨量が 200mm~ 300mm 程度に達すると球磨川の人吉水位観測所の水位 は、氾濫危険水位に到達する.従来の避難基準では、こ こから避難が行われる.しかし、球磨川上流域で豪雨が 生ずる間,人吉市街地でも 10mm/h~20mm/h 程の豪雨が



生じている.この豪雨によって、市街地の道路は冠水し、 避難困難な状況となる.このため、実際には外水氾濫の 避難基準の半日前に避難を開始し、道路が冠水するまで



図-32 各豪雨ピーク時における下薩摩瀬町内の避難路の浸水状況 (RIMEC)

の4時間の中で避難を完了することが必要であることが 分かる. さらに, 10mm/h 以上の豪雨が継続的に降るこ とが予想される場合には,降り始めの4時間程度前から 気象庁の短時間降水予報等の予測豪雨をインプットデー タとした RIMEC による予測解析を合わせて実施し,過 去豪雨と予測豪雨の両者の結果から主要な道路の浸水状 況の事前把握と内水氾濫による浸水前の安全な避難を検 討することとなる. 2022 年台風 14 号では,豪雨が主と して 18 日 10時頃から強く降り始めるため,その4時間 前の 18 日 6 時頃から予報豪雨を追跡し予測解析をする ことで,避難時間を考慮したリアルタイム内水氾濫予測 を実施することとなる.

以上より、外水氾濫の避難基準とともに、RIMEC から得た内水氾濫の避難基準を考慮した内水・外水氾濫の 重畳時の住民の避難とリアルタイム内水氾濫予測の考え 方を示した.今後は、数十・数百のより多くの豪雨に対 する RIMEC の実施とその経験の蓄積によって、内水氾 濫の避難時間や浸水機構の理解をより深めていくことが 重要になる.

# 市街地の流域水収支分布図を用いた被害軽減 に向けた検討

本章では、RIMEC 及び 2D-IMEC の解析結果とこれに 基づく流域水収支分布図を用いた被害軽減の検討から、 その活用意義を示す.流域水収支分布図は氾濫解析を行 うことで作成され、氾濫解析結果から地先の浸水状況の 変化等を示し、流域水収支分布図を用いて洪水ボリュー ム全体で浸水量や流域貯留量の変化を分析し被害軽減方 策とその効果を示すことで地域住民や防災関係者へ水害 リスクや被害軽減の考え方の共有を促すことできる.そ



図-33 豪雨ボリュームの異なる場合の流域水収支分布の比較(RIMEC)

の上で、RIMEC と 2D-IMEC の特徴に応じて、流域水収 支分布図の活用の狙いが異なる. RIMEC では、複数豪 雨における流域水収支分布図の比較から、どのような豪 雨が地域の浸水危険性を増大させるのかを検討する. 一 方, RIMEC では台地や丘陵地等の流域貯留を考える際 に、対策効果を仮定した流出流量ハイドログラフを与え ることとなるため、対策による雨水の流動や雨水流出・ 集水機構の変化等を解析へ反映することができない. こ のため、流域対策やまちづくり施策と一体的に検討する 場合には、2D-IMEC を用いて各地域に適した被害軽減方 策を検討することが重要となる.

#### (1) 異なる豪雨時の流域水収支分布の比較

異なる豪雨外力に対して流域水収支分布図を作成する ことで、豪雨毎の洪水流下特性や洪水水量の分担量を比 較することができ、どのような豪雨で市街地内の浸水リ スクが高まるかを検討することが可能となる. 図-31 に、 4章のRIMECを用いて検討した豪雨で総降雨量が概ね-致する 2022 年台風 14 号、2020 年 7 月豪雨、2018 年豪雨 における人吉市街地の流域水収支分布の比較を示す. な お、図-31 で示す低地浸水量の数値は最大値を示してい る. ここから、豪雨の時間的集中度合いが浸水量の増大 に対して大きく影響していることが分かる. 特に 2020 年 7 月豪雨は市内で高強度豪雨が集中したこと、本川水 位の立ち上がりが早いことにより排水量も小さくなり、 他の豪雨に比べ浸水量が急激に増大している. また、図 -32 に RIMEC から得た各豪雨の下薩摩瀬町内の避難路の 浸水状況を示す. どの豪雨においても内水氾濫によって、 避難の危険な状況となるが、2020年豪雨では流速 1.6m/s・水深 lm, 2022 年豪雨では流速 1.1m/s・水深 0.9m, 2018 年豪雨では流速 1.0m/s・水深 0.9m/s の浸水が最大で 生じ、地先の浸水危険性は流域水収支分布図と対応して いる. この氾濫流速等の差には、高強度豪雨の集中によ る浸水量の急激な傾きが大きく影響しているものと考え る. 次に,長期間に降り続く 2006 年豪雨と 2020 年 7 月 豪雨との比較を図-33に示す.ここでは、同一の時間・ 洪水ボリュームのスケールで示している. 2006年豪雨は, 総降雨量が900万m3程と洪水ボリュームの非常に大きい 豪雨で、2020年7月豪雨の1.2倍程度の浸水量となった。 豪雨ピーク時の人吉市街地全体の浸水状況は 2020 年豪 雨と同様の状況になるが、浸水量が緩やかに増加してい るため、市街地全体としては避難のリードタイムは長い 豪雨であった. なお、どの豪雨においても 2020 年豪雨 と同様に下林町や瓦屋町等の水路網沿川地域の浸水量が 大きく市街地内で浸水危険性の高い地域であることが分 かった.

以上より,複数豪雨の氾濫解析と流域水収支分布の分 析から,どんな豪雨が市街地全体として危険な豪雨にな り得るのか,これと対応するように地先でどのような浸 水状況となるのかを合わせて示すことで内水氾濫危険性 を住民へ分かりやすく説明することが可能となる.人吉 市街地では,2020年豪雨のような急激に高強度豪雨が集 中する場合に,市街地全体が浸水に至るまでの時間が短 く,避難に特に問題が生じやすいことが分かった.この ため,2020年豪雨に対する避難時間の確保や内水氾濫に よる被害軽減を考えることが特に重要となる.

#### (2) 被害軽減に向けた検討

流域水収支分布図は内水災害の見える化とともに、対 策前後で比較することによって、その効果を分かりやす く示すことができる. ここでは、内水氾濫の被害軽減に 向けた対策検討例を示す.人吉市の内水氾濫は、3章の 氾濫機構の分析より、村山台地や丘陵地、北部水田地帯 の上流域から豪雨流出の影響を大きく受けることが分か った.効果の高い対策とは、丘陵地や台地、水田、水路 網での貯留量,更には内水域からの排水量を増大させ, 低地の浸水量を減少させる対策であり、氾濫解析と流域 水収支分布図の両者の結果を丁寧に分析し、有効な対策 を見出すことが重要である. そこで、現在建設されてい る二次放水路対策、山江川流域における水田貯留、村山 台地上の公共施設における貯留、村山ため池の貯留を考 える(図-34). これらの貯留施設を考慮するため、2D-IMECで対象となる水田部を 0.5m, 校庭部を 0.3m 現況地 盤高から下げ、二次放水路を地形モデルへ反映させるこ と、ため池の初期水深 0m としてその全容量が治水利用 可能と考え、2020年豪雨を対象に解析を実施した.なお、 校庭貯留やテニスコートの貯留水深は鶴見川流域での流 域対策の検討例<sup>注5,注6</sup>を参考に0.3mとした.また、対策 を考慮した解析は RIMEC でも実施可能であるが、 貯留 施設が台地上に位置していることからタンクモデルから 算出される流量ハイドログラフに何らかの仮定を加える ことになるため、施設への雨水集水・貯留過程を追跡で きる 2D-IMEC を用いている. これらを考慮した対策前 後での流域水収支分布図の比較を図-35 に示す. 二次放 水路による排水量の増加、流域対策による丘陵地や台地 の貯留量の増加によって、浸水量の最大値が 22 万 m<sup>3</sup>程 に低減することが推算できた.また、これらの対策によ って、肥薩線北部の水田からの流出等の影響を強く受け る下林町において、図-36に示すように4日3時の氾濫 流速は大きく変らなかったが、浸水深が 0.3m 程度低減 される結果となった.このように、市街地の氾濫解析と 流域水収支分布図を用いて、内水災害や対策効果の見え る化をすることによって、各豪雨の浸水危険性と同様に 被害軽減に向けた考え方を地域住民や防災関係者に分か りやすく説明・共有することが可能となる.また、本研 究では, 流域一体の解析により対策による被害軽減効果 を示したが、例えば村山台地上の貯留施設の集水域を対 象として流域水収支分布を検討することも可能であり, 目的に応じてどのスケールでも流域水収支分布図を作 成・分析することが可能である.

### 7. 結論とまとめ

本研究で得られた結論とまとめを以下に示す.

- (1) 高精度な内水氾濫解析法(2D-IMEC)を2020年7 月豪雨時の人吉市に適用し、内水氾濫と外水氾濫 が重なることで甚大な被害が生じたことを示した. また、内水氾濫の実態を解明するとともに、リア ルタイム予測技術の構築に向けた教師データを得た.
- (2) 2D-IMEC で得た水収支分布等を教師データとして、 内水氾濫リアルタイム解析法(RIMEC)を構築した.そして、人吉市の過去の複数豪雨への適用から、内水氾濫によって避難が困難となる累加雨量や雨量強度等の豪雨条件を見出し、そこから住民の安全な避難時間を検討した.更に、RIMECの避難への活用として、内水・外水氾濫の危険性の高まる豪雨条件と予測や実況の豪雨状況を比較すること、さらには避難時間を考慮した(人吉市の場合は降り始めの4時間前)RIMEC による予測解析を合わせて実施することで、両者の検討結果に基づいて、市町村等が住民避難や避難時間を総合的に判断することが重要であることを示した。
- (3) RIMEC を用いて複数豪雨時の流域水収支分布を分析し、2020年7月豪雨時のような短時間に集中的に豪雨が襲う場合には、浸水量が急激に上昇するため避難に問題が生じやすいことを示した。そして、2D-IMECを用いて、避難時間の確保や内水氾濫による被害軽減に向けた対策検討例を示し、水田や丘陵地等における貯留量の増加・放水路対策による排水量の増加によって市街地全体の浸水量を低減させ、さらに地先の内水氾濫による浸水を軽減することが重要であることを示した。

2020年7月の人吉市で生じた内水・外水氾濫の重なる ような豪雨災害は各地で発生しており、内水氾濫を考慮 した避難のあり方を検討する必要性は極めて高い.その 上で、本研究で示す RIMEC の適用とその経験を蓄積に よって、豪雨時に各地域の住民避難を危うくする場所は どこなのか、どれ程の豪雨で避難路が冠水するのか等を 認識し、市街地の浸水機構や避難時間を学ぶことが重要 である.また、雨水がどの様に集水され、浸水・氾濫を 引き起こしているかという自然現象そのものを表現する 流域水収支分布図は、氾濫解析結果と合わせて活用する ことで、内水氾濫の因果をより分かり易く示すことが出 来る.この水収支分布図の作成と活用によって、河川管 理者と自治体・地域住民を含む地域関係者が水害リスク や協働の考え方を共有し、避難や減災まちづくりに資す る流域治水を進めることが重要である.

一方,人吉市を含む内水氾濫と外水氾濫の両リスクが 高い地方都市においては,内水氾濫の検証データや水路 網・ため池等の水位データが乏しいことが多い.本研究 における 2D-IMEC や RIMEC の山地流出や浸水機構等の







図-36 2D-IMECを用いた 2020 年 7 月豪雨時 4 日 3 時の対策前後での下林町周辺の浸水状況の比較 (左:対策未考慮,右:対策考慮)

再現性にも課題があるものと考えており、今後は、水位 計を水路網や台地上のため池等の多地点で設置すること、 市街地内の浸水危険箇所等で浸水センサーを設置するこ とを通じて、これらを教師データとした 2D-IMEC や RIMEC を実施し、内水氾濫機構をより正確に把握する と共に、避難や減災まちづくり、流域治水の検討を行う ことが重要である.

謝辞:研究を進めるにあたり、国土交通省九州地方整備 局、熊本県、人吉市それぞれの関係部局よりデータ提供 と複数回にわたる人吉市内水検討会において有意義な議 論を頂いた.記して謝意を表する.

# NOTES

- 注1) 人吉市:地区別懇談会だより vol.1 (広報ひとよし 6 月号) 薩摩瀬地区ご意見(第 1 回・第 2 回), https://www.city.hitoyoshi.lg.jp/toppage/gousaigai/gou\_ fukko/34912 (2024年9月8日アクセス可)
- 注2) 人吉下球磨消防組合消防本部:令和2年7月豪雨活動記録誌,2021. http://fire119-hitosho.com/kirokusi/
   (2024年3月29日アクセス可)
- 注3) 国土交通省:地下空間における浸水対策ガイドライ ン同解説<技術資料>, 2002. https://www.mlit.go.jp/ river/basic\_info/jigyo\_keikaku/saigai/tisiki/chika/tech. html (2024年3月29日アクセス可)
- 注4) 人吉市:令和5年度人吉市地域防災計画書・水防計 画, pp. 87, 2023. https://www.city.hitoyoshi.lg.jp/ kurashi/bosai\_bohan/bosai/38376 (2024年3月29日アク セス可)
- 注5) 国土交通省:第1回気候変動を踏まえた水災害対策 検討小委員会配布資料,資料3,pp.18,2019. https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\_blog/shaseishin/ kasenbunkakai/shouiinkai/kikouhendou\_suigai/1/index. html (2024年3月29日アクセス可)
- 注6) 東京都総合治水対策協議会:公共施設における一次 貯留施設等の設置に係る技術指針, 2016. http://www. tokyo-sougou-chisui.jp/shishin/ (2024 年 3 月 29 日アク セス可)

#### REFERENCES

- 田端幸輔,後藤岳久,竹村吉晴,酒匂一樹,福岡捷 二:令和2年7月球磨川豪雨における洪水流と氾濫 流の一体解析による人吉市街地と狭隘区間の集落の 被害分析,河川技術論文集,第27巻,pp.597-602, 2021. [Tabata, K., Gotoh, T., Takemura, Y., Sakou, K. and Fukuoka, S.: Flood damage analysis for urban district and mountainous narrow area by integrating analysis of flood flow and inundation under the 2020 Kumagawa heavy rain, *Advances in River Engineering*, Vol. 27, pp. 597-602, 2021.]
- 福岡龍,福岡捷二,赤池雄二,万江尚幸,山本修一, 鳥越輝喜,仲田裕一郎,向田清峻:豪雨時における 人吉市内の内水氾濫機構の分析と被害軽減に向けた 検討,河川技術論文集,第29巻,pp.419-424,2023. [Fukuoka, R., Fukuoka, S., Akaike, Y., Mae, N.,

Yamamoto, S., Torigoe, T., Nakata, Y. and Mukaida, K.: Analysis of urban flooding mechanisms in Hitoyoshi City under heavy rainfall and study for damage mitigation, *Advances in River Engineering*, Vol. 29, pp. 419-424, 2023.]

- 福岡捷二:洪水水面形観測情報の広域的・統合的利 用による流域治水の考え方の構築に向けて、河川技 術論文集,第23巻、pp. 251-256, 2017. [Fukuoka, S.: Creating an idea of integrated river plan due to the use of wide-spread water surface profiles of floods in river basins, *Advances in River Engineering*, Vol. 23, pp. 251-256, 2017.]
- 福岡捷二:近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える、河川技術論文集、第 28 巻、pp. 457-462, 2022. [Fukuoka, S.: Thinking about basin-wide flood control initiatives based on the recent large floods, *Advances in River Engineering*, Vol. 28, pp. 457-462, 2022.]
- 5) 見上哲章, 水草浩一, 西澤洋行, 安達孝実, 福岡捷 二:利根川上流域の本・支川を一体とした洪水流解 析一流域治水への活用に向けて一, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 77, No. 2, pp. I\_427-I\_432, 2021. [Mikami, T., Mizukusa, K., Nishizawa, Y., Adachi, T. and Fukuoka, S.: The integrated flood flow analysis for the Tone River and its tributaries using observed water surface profiles, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1* (*Hydraulic Engineering*), Vol. 77, No. 2, pp. I\_427-I\_432, 2021.]
- 6) 石井優太朗,吉村俊彦,福岡捷二:石狩川下流域に おける支川群の洪水流出特性と本川洪水への影響, 河川技術論文集,第28巻, pp. 121-126, 2022. [Ishii, Y., Yoshimura, T. and Fukuoka, S.: Characteristics of tributary floods in the lower Ishikari River basin and effects of tributary floods on the main river floods, *Advances in River Engineering*, Vol. 28, pp. 121-126, 2022.]
- 福岡捷二,川島幹雄,横山洋,水口雅教:密集市街 地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害 軽減対策の研究,土木学会論文集,No. 600/II-44, pp. 23-36, 1998. [Fukuoka, S., Kawashima, M., Yokoyama, H. and Mizuguchi, M.: The numerical simulation model of flood-induced flows in urban residential area and the study of damage reduction, *Journal of Japan Society of Civil En*gineers, No. 600/II-44, pp. 23-36, 1998.]
- 関根正人:住宅密集地域を抱える東京都心部を対象 とした集中豪雨による内水氾濫に関する数値解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 67, No. 2, pp. 70-85, 2011. [Sekine, M.: Numerical analysis of inundation in the region of downtown Tokyo with residence area, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 67, No. 2, pp. 70-85, 2011.]
- 9) 関根正人,浅井晃一,古木雄:Xバンド MP レーダ による降雨データを用いたリアルタイム浸水予測に 向けた試み,土木学会論文集 B1(水工学),Vol. 70, No. 4, pp. I\_1423-I\_1428, 2014. [Sekine, M., Asai, K. and Furuki, Y.: Real-time prediction of inundation by using highresolution rain data of X-band radar, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 70, No. 4, pp. I\_1423-I\_1428, 2014.]
- 10) 佐貫宏,渋尾欣弘,李星愛,吉村耕平,田島芳満, 古米弘明,佐藤愼司:様々な氾濫因子を考慮した都 市沿岸部の氾濫予測解析,土木学会論文集 B2 (海岸)

工学), Vol. 72, No. 2, pp. I\_517-I\_522, 2016. [Sanuki, H., Shibuo, Y., Lee, S., Yoshimura, K., Tajima, Y., Furumai, H. and Sato, S.: Inundation forcast simulation in urbanized coastal low-lying areas considering multiple flood causing factors, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2* (*Coastal Engineering*), Vol. 72, No. 2, pp. I\_517-I\_522, 2016.]

- 11) 菅原正巳:流出解析法,共立出版,1972. [Sugawara, M.: Runoff Analysis Method, Kyoritsu Suppan, 1972.]
- 12) 吉野文雄,吉谷純一,堀内輝亮:分布型流出モデル の開発と実流域への適用,土木技術資料, Vol. 32-10, pp. 54-59, 1990. [Yoshino, F., Yoshitani, J. and Horiuchi, T.: Development of the distributed models for river basins,

Civil Engineering Journal, Vol. 32-10, pp. 54-59, 1990.]

13) 吉田護, 柿本竜治:避難の備え及び災害関連情報の 取得による避難行動への因果効果の推計一令和2年 7月豪雨,人吉市の事例を通じて一,土木学会論文 集, Vol. 79, No. 7, 22-00210, 2023. [Yoshida, M. and Kakimoto, R.: Causal inference for effects of preparedness or acquisition of disaster-related information on evacuation behavior—A case study of the heavy rain event of 2020 July—, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol. 79, No. 7, 22-00210, 2023.]

> (Received May 7, 2024) (Accepted April 9, 2025)

# DEVELOPMENT OF THE REAL-TIME 2D INUNDATION MODEL AND ITS APPLICATION TO THE EVACUATION AND COMMUNITY PLANNING

### Ryu FUKUOKA and Shoji FUKUOKA

During the torrential rainfall in July 2020, Hitoyoshi City was severely damaged by the combination of internal flooding and external flooding. In this study, we developed real-time inundation model for evacuation and community planning (RIMEC) in Hitoyoshi city using the results of the high-precision internal flooding analysis (2D-IMEC) as teacher data. By applying RIMEC to multiple heavy rainfall events in the past, we found the new evacuation criterion considering internal flooding, and showed its application to the real-time prediction of internal flooding.

Furthermore, we showed that it is possible to share the risk of flooding and the concept of damage mitigation with local stakeholders by creating the basin water balance map based on the analysis results of 2D-IMEC and RIMEC, which clearly shows the changes in the flooding situation and its amount.