

# 市街地における豪雨時の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

## Development of the real-time 2D inundation model and its application to the evacuation and community planning

22N3100051B 福岡 龍 (河川工学研究室)

Ryu FUKUOKA / River Engineering Lab.

**Key Words :** urban inundation, real-time inundation analysis, evacuation, basin water balance map

### 1. 序論

流域治水では、本川流域、支川流域、市街地域の多層的な流域スケールの中で各流域に応じた協働の考え方を共有することが求められる。そこでは、防災関係者や地域住民に対して流域の降雨流出、洪水流下、氾濫の形態を分かりやすく説明し、将来の河川整備・土地利用・氾濫に対する備え方をどう考えるかを議論することが第一に重要である。この技術的検討法として、福岡市は流域水収支分布図を提案し、規模の異なる各河川流域での検討からその活用意義を示している。

一方、近年の内水氾濫の高頻度化や内水氾濫と外水氾濫の重複災害の及ぼす被害の大きさを考えると、市街地の内水域においても説明力の高い内水氾濫解析モデルとこれに基づく流域水収支分布図を構築することが流域治水上の重要課題となる。また、本研究の対象となる人吉市街地では、令和2年7月豪雨時に内水氾濫に引き続く外水氾濫の発生により激甚な被害が生じている。このため、内水・外水氾濫リスクが高い地域の住民避難の在り方とこれを支える内水氾濫予測技術を検討することも喫緊の課題と言える。

本研究は、図-1に示す2つの構成から成る。第一は、令和2年7月豪雨時の人吉市街地における内水氾濫現象を高精度に解析可能な内水氾濫解析法（2D Inundation Model for Evacuation and Community planning : 2D-IMEC）を構築する。そして、2D-IMECを教師データとした内水氾濫リアルタイム解析法（Real-time Inundation Model for Evacuation and Community planning : RIMEC）とこれに基づく市街地水収支分布図の構築を行い、今後の住民避難・減災まちづくりへの活用を示す。

### 2. 豪雨時の人吉市街地における内水氾濫機構

#### (1) 対象市街地と令和2年7月豪雨の概要

図-2の左図に、対象となる人吉市街地（約10km<sup>2</sup>）を示す。この地域では、空色で示す幅4m程の水路を通じて球磨川等へ雨水を排水している。令和2年7月豪雨では、4日6時頃から球磨川や万江川等の氾濫流が市街地に流れ

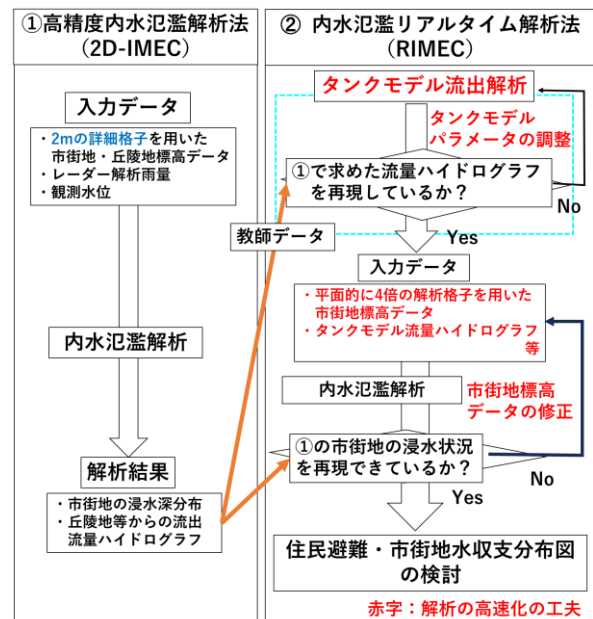


図-1 本研究の全体像

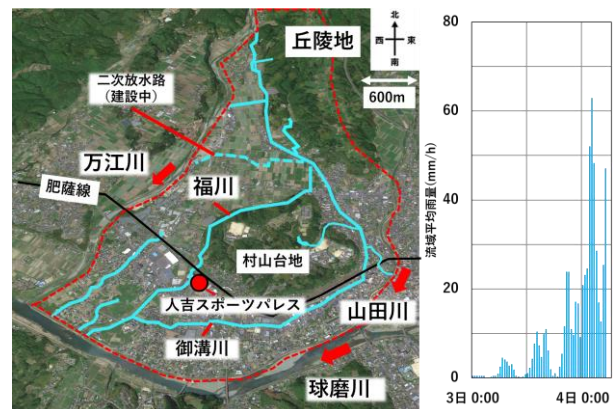


図-2 対象地域の概要（左）と  
令和2年7月豪雨の人吉市街地の降雨量（右）

込むことで、全世帯の5分の1が浸水し、21名に上る甚大な人的被害が生じた。図-2の右図は、令和2年7月豪雨の時間分布を示している。市街地では、60mm/h程の高強度の豪雨が生じていた。また、南部市街地に比べて北部の丘陵地等では70mm程多くの雨が短時間に降った。

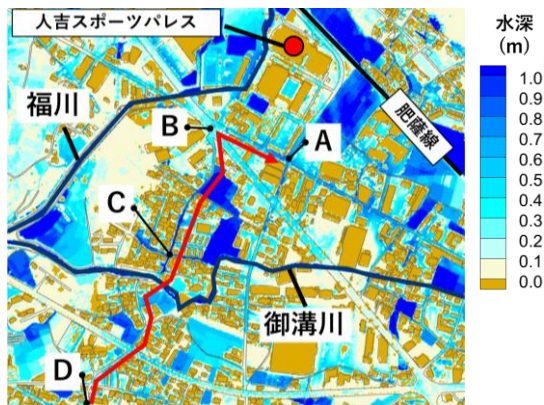


図-3 令和2年7月豪雨時（4日3時）の  
湛水深コンター(2D-IMEC)

## (2) 内水氾濫解析法（2D-IMEC）

2D-IMECでは、約10km<sup>2</sup>の市街地における丘陵地・台地からの降雨流出、水路網の流れ、氾濫について平面二次元不定流解析法を適用する。与える降雨は、気象業務支援センターのレーダー解析雨量（1km毎、30分間隔）を用いて、降雨の時空間分布を考慮する。各水路の下流端には、田端<sup>2)</sup>の球磨川本支川一体での洪水流・氾濫解析より得られた水位を与えた。

ここから、2D-IMECの特徴である高精度な市街地・地形モデルについて述べる。幅4m程の水路網の流れを解くため、解析格子サイズを平面的に2mとしている。この詳細な解析格子を用いて、L.P.オリジナルデータ・河道データ等を基に水路網・道路網・住宅群等の標高を2m間隔で市街地・地形モデルに取り込んでいる。住宅群の配置や標高は不透過な地形とした。更に、丘陵地や台地からの雨水流出機構を明らかにするため、国土地理院のDEMデータを用いて地表面形状を再現した。これにより、市街地内の雨水や氾濫流の流れを高精度に解析可能なモデルを構築した。

## (3) 令和2年7月豪雨時の人吉市街地の内水氾濫機構

2D-IMECから得られた避難所（人吉スポーツパレス）周辺の湛水深コンターを図-3に示す。豪雨による湛水に加え、御溝川や福川等からの氾濫により市街地の至る所で道路冠水が生じた。特に、避難所に向かう道路（A～D点）では、地形的に雨水や氾濫水が集まりやすく、図-4、5のように降雨の強まる4日0時以降にかけて浸水位が急激に上昇した。この結果、外水氾濫発生前の4日3時の段階で内水氾濫により、浸水深1m・流速1m/sを超え、避難困難な浸水状況に至った。そして、図-6に示すように4日7:30には内水氾濫による移動困難な浸水状況に、外水氾濫が重なることで甚大な被害が生じた。このため、内水氾濫に続く外水氾濫が発生するような豪雨では、内水氾濫の初期段階での住民避難とこれを支える予測技術が必要となる。

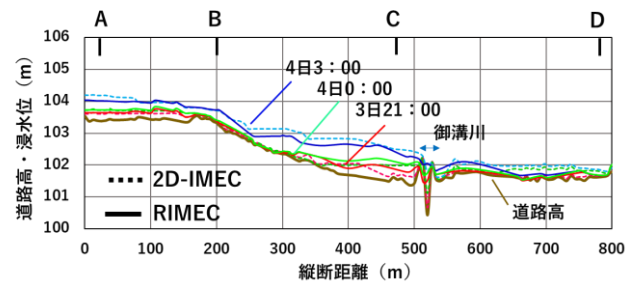


図-4 令和2年7月豪雨時の避難路の  
水面形時系列

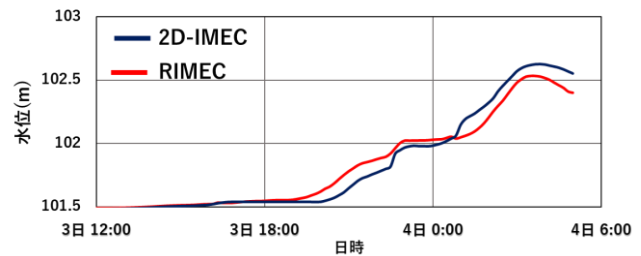


図-5 C点の浸水位ハイドログラフ

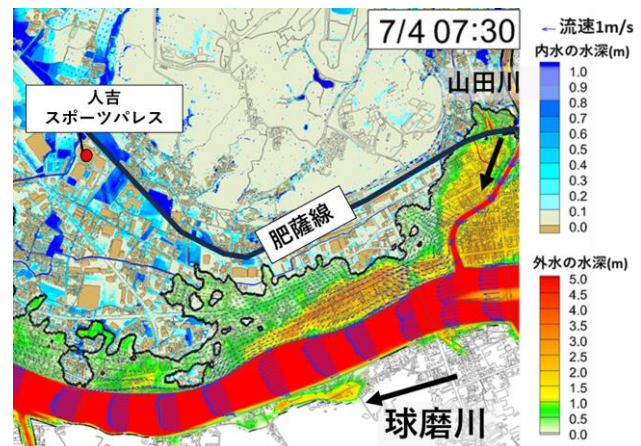


図-6 令和2年7月豪雨時の内水氾濫（2D-IMEC）  
と外水氾濫解析<sup>2)</sup>結果の重ね図

## 3. 内水氾濫リアルタイム解析法（RIMEC）の構築と住民避難への活用

### (1) 内水氾濫リアルタイム解析法（RIMEC）の構築

2章では、2D-IMECを用いた令和2年7月豪雨の解析から内水氾濫の初期段階での避難と予測技術の必要性を強調した。一方で、2D-IMECは、約1日の豪雨解析に1週間程を要してしまい、住民避難を支える予測技術への適用は困難である。そこで、2D-IMECの解析結果を教師データとした内水氾濫リアルタイム解析法（RIMEC）を構築する（図-1）。本研究のリアルタイム解析は、過去の多数の豪雨について事前に解析しておき、予想対象豪雨と類似する過去の豪雨における氾濫や浸水の進行に基づいて、避難に必要な時間や浸水状況の推定を行う。このRIMECの構築に向けて、2つの高速化の工夫を行った。第一は、2D-IMECの解析結果に基づいた丘陵地や台地の小流域分割とそれへのタンクモデルの適用

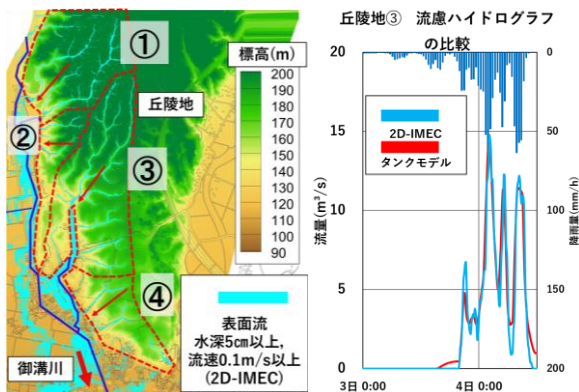


図-7 2D-IMECに基づく丘陵地の小流域分割とタンクモデル流量の算出

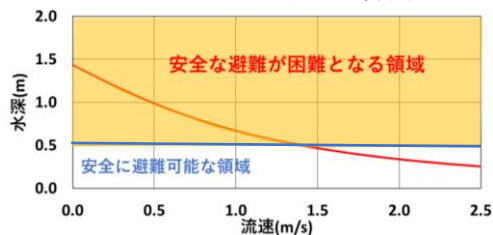


図-8 避難が困難となる水深と流速の組み合わせ

である。図-7の左図は、標高コンターに2D-IMECから得られる雨水の流れを空色で重ねたものを示している。これを基に赤線のように丘陵地を小流域に分割する。また、図-7の右図のように2D-IMECから得た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パラメータを同定する。第二は、解析格子サイズの拡大である。人吉市街地の場合、格子サイズを平面的に4倍に拡大し、2D-IMECにおける浸水深や氾濫流速等の実態を説明できるように市街地・地形モデルを修正した。これにより、解析時間は1日の豪雨解析に対して19時間程となった。この結果は、図-4.5に示すように市街地の浸水状況や避難で重要な浸水位の立ち上がりを概ね再現することが出来ている。

## (2) RIMECの住民避難への活用

ここでは、人吉市街地での幾つかの主要豪雨を対象としたRIMECの住民避難への活用を示す。対象豪雨は、令和2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つの豪雨事例とした。そして、図-8に示す歩行避難が困難となる水深・流速が生じた場所とその時刻について市街地の累加雨量の関係を分析した。図-9は、令和4年台風14号の分析結果を示している。未着色の箇所は、避難可能箇所を示している。氾濫域の地形特性のため、避難所や台地に向かうために重要な国道445号が70mm～90mm程の累加雨量に達すると避難困難な浸水状況となった。各豪雨について同様の検討を行った結果、どの豪雨においても累加雨量が80mm程になると、この道路では避難困難な浸水状況になることが分かった。し

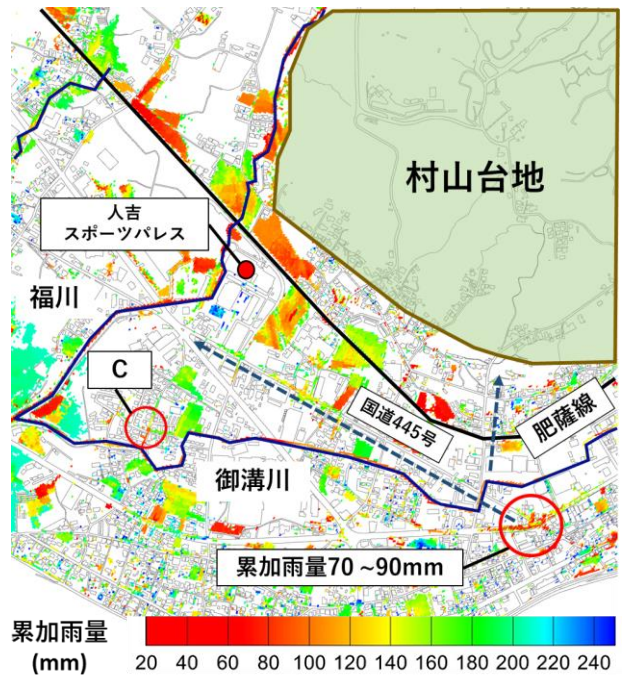


図-9 令和4年台風14号時の避難困難箇所と累加雨量分布

かし、累加雨量80mmに達する時間は各豪雨の降雨強度に応じて異なり、降雨強度10～20mm程の豪雨の場合には4時間、それ以上の強度の場合には2時間程で移動困難な状況に至った。また、図-3.9のC点の避難道路は、どの豪雨でも早い段階で豪雨の湛水や御溝川等の氾濫流の流下により、水深・流速ともに増大し、危険な状況となった。この地域では、市街地の中でも特に垂直避難や早期避難を行うことが重要となる。垂直避難や早期避難の選択を含め、避難を考える際には、内水氾濫だけでなく外水位との関係を見ながら避難判断が行われる。そこで、過去の主要洪水時の球磨川の水位と累加雨量の関係を分析した。球磨川の人吉上流域で累加雨量200～300mm程に達すると、氾濫危険水位に迫る水位上昇が生じることが分かった。

この内水・外水氾濫に関する累加雨量と降雨強度を参考にしながら、避難に必要な時間や浸水状況の推定を行うことが重要と考える。そこでは、気象庁の公開する6時間先までの降水短時間予報等とRIMECの結果を照らし合わせながら、検討することとなる。今後は、RIMECの試行回数を増やし、より多くの豪雨に対する市街地の降雨と浸水の進行の関係を分析し、豪雨に対する避難や浸水機構の理解を深めることが重要である。

## 4. 市街地における流域水収支分布図の構築と被害軽減に向けた検討

### (1) 市街地水収支分布図を用いた内水災害の見える化

市街地水収支分布図は、豪雨分布と氾濫解析から市

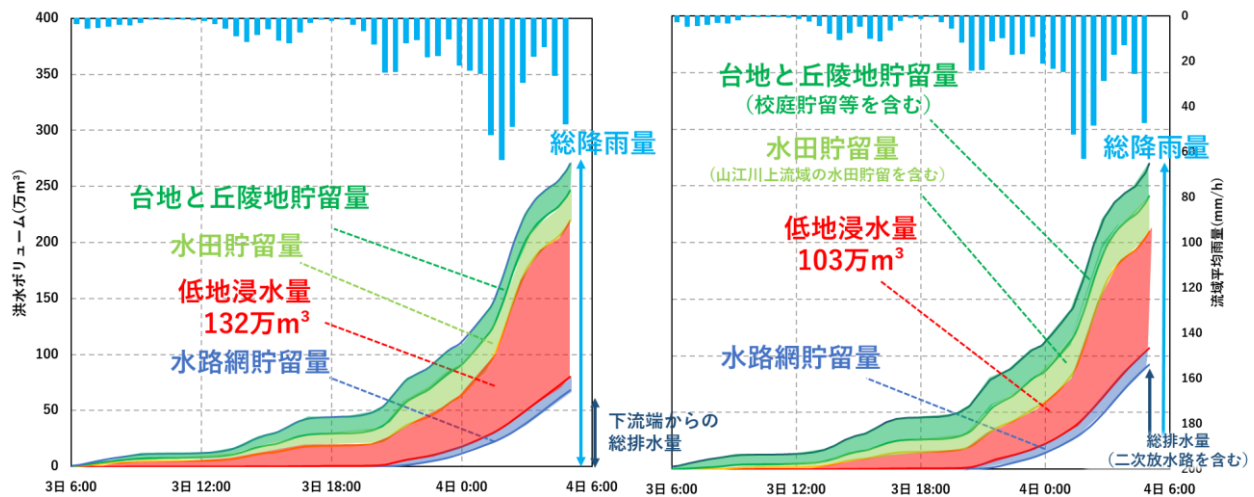


図-10 令和2年7月豪雨時の人吉市街地の流域水収支分布図（左：対策未考慮、右：対策考慮）

街地内に存在する水の量とその時空間的な貯留量分布を求めることで、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するかを見える化する。図-10の左図は、RIMECに基づく令和2年7月豪雨時の市街地水収支分布図を示している。令和2年7月豪雨時には、急激な降雨量の増大により、赤色で示す市街地浸水量が急激に増大していることが分かる。このため、避難時間が短く大きな問題が生じたと考える。今後は、緑や黄緑色で示す丘陵地や水田等の流出抑制や放水路による分流によって、低地での浸水量を低減させること、あるいはピークを遅らせることが課題となる。このように市街地水収支分布図を作成することで、内水災害の全体像が見える化し、被害軽減の考え方を共有することが可能となる。

## (2) 被害軽減に向けた検討

市街地水収支分布図は、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、その効果を推算することが出来る。ここでは、市街地水収支分布図を用いた被害軽減への活用を示す。考える対策は、現在建設中の二次放水路、丘陵地での水田貯留（貯水深：50 cm）、台地上の公共施設での貯留（校庭・テニスコートの貯水深：30 cm）やため池の治水利用等を想定する。これらを考慮した結果を図-10の右図に示す。二次放水路による排水量の増加（約22万 $\text{m}^3$ ）、流域対策による丘陵地や台地の貯留量の増加（約7万 $\text{m}^3$ ）により、浸水量が132万 $\text{m}^3$ から103万 $\text{m}^3$ 程に低減することが推算できた。この結果に合わせて、市街地内の床上浸水の面積や家屋数の減少等を示すことで対策の意義を分かり易く示すことが重要と考える。このように、市街地水収支分布図を用いた内水氾濫現象や対策効果の見える化が、住民の避難計画や今後の減災まちづくりの検討に役立つと考える。

## 5. 結論と今後の課題

本研究では、2mの詳細な解析格子を用いた内水氾濫解析（2D-IMEC）から令和2年7月豪雨時の人吉市街地における内水氾濫の実態を解明し、内水氾濫の初期段階の避難とこれを支える予測技術の必要性を明らかにした。しかし、2D-IMECの解析には時間を要することから、この結果を教師データとした解析の高速化を通じて、内水氾濫リアルタイム解析（RIMEC）を行い、人吉市街地で生じた幾つかの主要豪雨に対する住民避難を検討した。この結果、どの豪雨においても累加雨量80mm程に達すると歩行避難の困難な浸水状況となることを明らかにした。内水氾濫と外水氾濫の重複災害が懸念される地域の住民避難を考える際には、RIMECを用いて多数の豪雨を検討し、各豪雨に対する避難の考え方や市街地の浸水機構の理解を深めていくことになる。

更に、氾濫解析の結果から市街地の流域水収支分布図を構築した。そして、令和2年7月豪雨のような短時間に豪雨が集中する場合には浸水量が急激に増大し、避難に問題が生じやすいことを見える化した。また、内水災害の被害軽減に向けて、対策検討例を示し、市街地水収支分布図を用いた内水氾濫現象・対策効果の見える化が、被害軽減に向けた考え方を共有する上で有効であることを示した。以上より、RIMECとこれを用いた市街地水収支分布図の活用が、住民の避難計画や減災まちづくりに役立つことを示した。

## 参考文献

- 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-pp.462,2022.
- 田端幸輔ら：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狹隘区間の集落の被害分析，河川技術論文集第27巻，pp.597-pp.602,2021.