

中小河川群における内外水氾濫過程を踏まえた 地区別の避難判断・行動に関する研究

STUDY ON EVACUATION ALERT, CAUTION AND ACTIVITY BASED ON FLOOD RISK AND SCENARIO OF SMALL-MEDIUM RIVERS

中島秀明¹・田中耕司¹・中北英一²・竹之内健介³・矢守克也⁴・
養老伸介⁵・羽生雅則⁵

Hideaki NAKASHIMA, Kohji TANAKA, Eiichi NAKAKITA, Kensuke TAKENOUCHI
Katsuya YAMORI, Shinsuke YUURU and Masanori HANYU

¹正会員 修(工) (株) 建設技術研究所大阪本社水システム部 (〒545-0008 大阪市中央区道修町1-6-7)

²正会員 工博 京都大学教授 防災研究所気象・水象災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³非会員 修(工) 京都大学 情報学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町36-1)

⁴非会員 博(人間科学) 京都大学教授 防災研究所巨大災害研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵非会員 福井県大野市 防災防犯課 (〒912-8666 福井県大野市天神町1番1号)

Municipalities may not suitably alert evacuation warning and caution to residents in districts. This study describes about methods of evacuation judgment criteria based on the flood risk at each district in order to alert proper evacuation warning and caution according to necessity and priority of evacuation at each district. Flood flowing analysis model which simulate the inundation process in flood plain of several small-medium rivers in Ono city of Fukui Pref was developed. We estimated flood risk in Ono city from design rainfall of river planning, probable maximum rain fall around Ono city and an event of the Okuetsu heavy rainfall. As results of analysis of flood risk, it is shown that timing and priority order to alert evacuation warning and caution according to flood risk at each district was able to be established.

Key Words : Flood Risk and Scenario, evacuation, Flood Flow Analysis, Small-Medium rivers

1. はじめに

平成25年には、台風の襲来、前線性・局地的な集中豪雨が頻発し、インフラ整備の計画目標を上回るような豪雨が発生し、洪水や土石流により多くの人命が失われた¹⁾。一方で、気象情報や防災情報がインターネット、メール等を介し住民にも即座に配信されるシステムも整備されてきた。しかしながら、基礎自治体、自主防災組織などの防災担当者は、そのような情報と地区単位での氾濫リスクといった情報を組み合わせ、活用できているとは言えない状況にある。すなわち、どの地区がどの程度のリスクがあるのかを事前に予測できれば、地域を限定した段階的な避難勧告を発令することや、リスクに応じた避難行動を指示することができるものと考えられる。

本研究で対象にしている福井県大野市においては、現在地域防災計画の改訂にあたり、昨今の災害事例¹⁾から、現実的な避難勧告等の発令の方法や、それに伴って判断・行動できる住民の防災意識の啓発といった課題に対

処していくことを検討している。この背景として、大野市ではゲリラ豪雨のような短時間の豪雨が頻繁に発生し、行政は避難勧告の発令や住民は避難方法、行動を判断することに苦慮している。さらに、平成16年7月の福井豪雨²⁾など身近に豪雨災害が発生していることや、平成25年台風18号襲来の際に発令された特別警報に対して、地域に対する行政の役割をより明確にすることは、大野市に限らず自治体が抱えている問題であると考えられる。

本研究では、上記のような課題を認識しつつ、大野市において洪水氾濫を起こす外力として降雨強度式に基づくモデルハイエトや、DAD解析による最大降雨、既往の最大降雨が襲来したときに、市内の浸水被害状況を内外水氾濫モデルによる解析から想定した。さらに、解析結果から降雨規模毎・地域毎に把握した氾濫リスクを評価し、最大級の豪雨が襲来したときのシナリオから、地域毎の避難勧告の発令の優先順位や、避難判断や行動を事前に想定する方法について提案するものである。

2. 福井県大野市の地域防災計画の課題

中小河川が貫流している大野市においては、河川の基準水位に対する河川水位の変化に応じた避難勧告等を発令することが、地域防災計画で決められている。この基準をみると、「避難判断水位（あるいは氾濫危険水位）を超えると予想されるとき」や、「水位観測所が避難判断水位に到達したとき」といった記述があるが、以下のような問題がある。

- ・洪水予測を実施していない中で、河川の水位を予想する手だてがない。
- ・大野市内を流れる河川が氾濫危険水位に到達するときには、堤内地で内水氾濫が発生している可能性があり、住民は逃げたくても逃げることが出来ず、さらに躊躇する可能性がある。

このような問題は、住民への発令が難しくするばかりでなく、発令する時期を逸すれば、その発令の効力を失う可能性もある。そこで、次のような課題を解決することに帰着するのではないかと著者らは考えている。

- ・大野市を細分化した地域単位での氾濫リスクの開示
- ・氾濫リスクが発生する降雨量、河川水位の情報整理と開示

以上のことを検討することが、行政から住民への避難勧告発令の判断や、避難所の開設といった準備段階において効率性が向上するものと期待される。

3. 高解像度内外水氾濫解析モデルの適用

(1) 氾濫モデルの概要

大野市内を貫流する複数の河川の浸水想定区域図³⁾は、250m四方あるいは100m四方による外水氾濫を対象に作成されている。本研究では、近年のゲリラ豪雨による雨水排水路（開水路）の溢水による内水被害や、福井豪雨の時の外水氾濫といった、複合的な氾濫現象を捉えるために、大野市街地を含む盆地を対象にして、25mメッシュの空間解像度を基本とした図-1に示す概念の内外水氾濫モデルを構築した。本研究においては、NILIMモデル⁴⁾を基本として、今回の目的に合わせて修正した。すなわち、図-1に示すように、河川からの外水氾濫、堤内地の家屋等での雨水排水とそれと接続する町中を張り巡らされた雨水排水幹線網からの溢水、雨水排水路と河川の接続部、土地利用毎の損失雨量を考慮した雨水貯留効果、といった一連の現象をシミュレートするものである。

(2) 支配方程式

河道内の流れは、一次元不定流モデル⁴⁾を、氾濫流は、平面二次元不定流モデル⁴⁾を参考にして、水路からの溢水と降雨量を湧き出し項で考慮した.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q_e + q_{up} \quad (1)$$

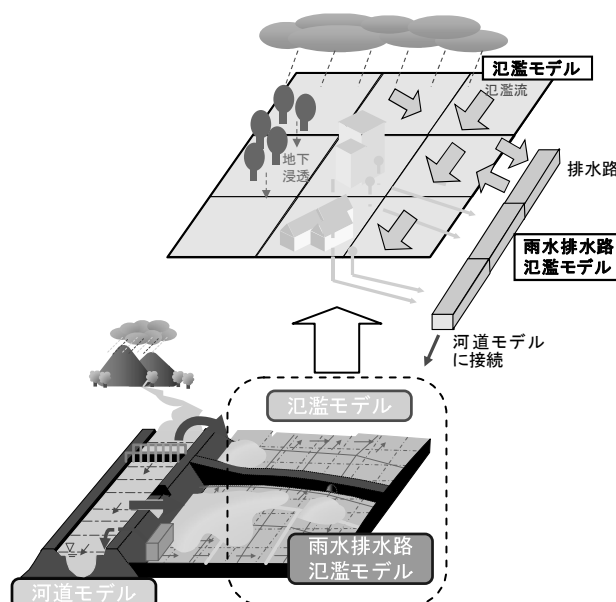


図-1 内外水氾濫モデルの概念図

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \frac{\partial}{\partial y}(vM) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \frac{\partial}{\partial y}(vN) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_{by} \quad (3)$$

ここに、 h は水深、 q_e は降雨流出量（地下浸透等を考慮した有効降雨量）、 q_w は水路から単位面積当たりの溢水流量、 H は水位、 g は重力加速度、 ρ は水の密度、 $M = uh$ は x 方向流量フラックス、 $N = vh$ は y 方向流量フラックス、 u は x 方向流速、 v は y 方向流速、 n は土地利用や建物占有率を考慮した粗度係数、 x は x 方向距離、 y は y 方向距離、 t は時間である。

つぎに、大野市内の雨水排水路網については、diffusion wave近似を行った以下の支配方程式⁴⁾を用いた。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{in} \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = S_0 - S_f = S_0 - \left(\frac{n^2}{R^{\frac{4}{3}}} + \frac{k}{2gL} \right) \frac{Q^2}{A^2} \quad (5)$$

ここに、 A は流水断面積、 Q は流量、 q_{in} は横流入量（＝ $q_{sew} - q_{up}$ ）， q_{sew} は地上から排水路への単位面積当たりの雨水排水流量、 n は粗度係数、 R は径深、 S_{ol} は水路底勾配、 h は水深、 L は水路長、 S_{fl} は摩擦損失勾配である。

式(1)中の q_e については、建物とそれ以外に分類し、雨水流出を簡易的にモデル化した。建物については、メッシュ格子内の屋根に降った雨水を排水路に直接流入させた。また、建物以外の地表面流出について、土地利用に応じた浸透による降雨損失⁵⁾を考慮したモデルを適用した。

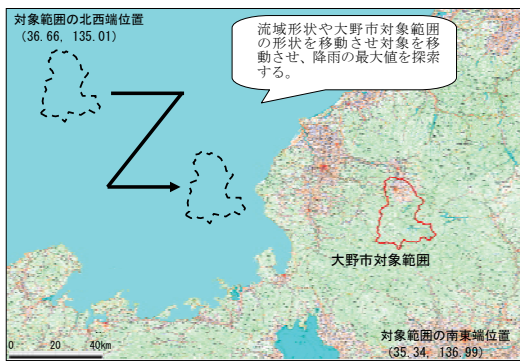


図-2 最大雨域の抽出範囲

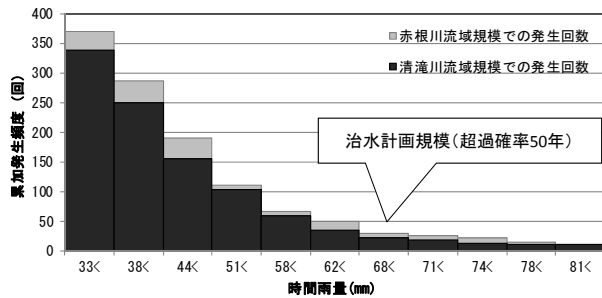


図-3 1時間雨量の発生頻度（集中豪雨・前線性）

$$q_e = \begin{cases} \lambda r \\ (1 - \lambda) r_e \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 q_e は単位面積当たりの降雨流出量、 λ はメッシュに対する屋根面積の比率、 r は降雨量、 r_e は有効降雨量である。

(3) 計算条件の設定

a) 降雨条件

降雨条件としては、対象としている河川（赤根川、清滝川）の治水計画で採用されている福井県降雨強度式（平野部、奥越山間部）⁶⁾（10年～200年）から中央集中型波形を作成した。

さらに、今後上記の規模を越えるような規模の豪雨が襲来する可能性は否定できない。そこで、図-2に示す福井県大野市周辺の平成15年～平成25年までの全国合成レーダ雨量から、流域形状や大野市の形状で降雨継続時間毎の最大雨域を探索⁷⁾した。この雨域による氾濫解析は、実績降雨でかつ、近隣の最大降雨が大野市に襲来することを想定した設定である。抽出した局地的豪雨や前線性豪雨に限っては、大野市でも発生する可能性がある。そこで、抽出した降雨サンプルが治水計画規模の時間雨量（超過確率50年）を越える回数を集計した結果を図-3に示す。その結果、大野市近隣では超過確率50年の時間雨量を豪雨が過去10年間で30回も発生していることがわかった。これは、今後抽出した豪雨が大野市に襲来した場合、計画規模の外力（超過確率50年相当）で作成されている浸水想定区域よりも浸水が拡大する可能性があることを示唆している。

また、大野市においては、昭和40年9月奥越豪雨⁸⁾を経

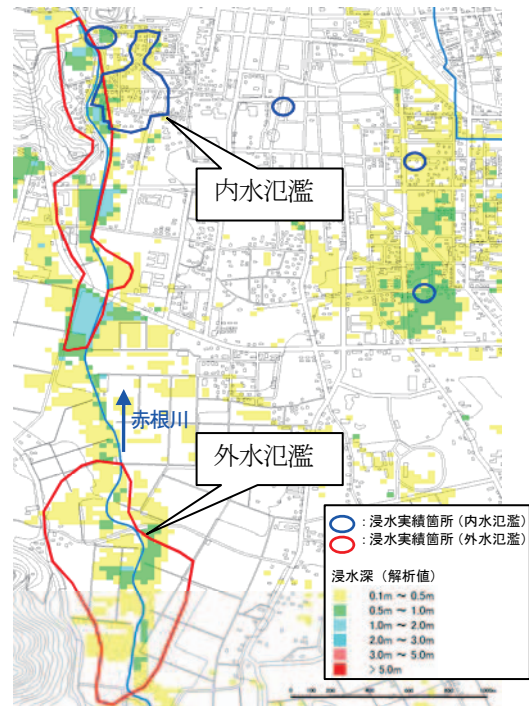


図-4 平成16年7月洪水での実績氾濫範囲との比較

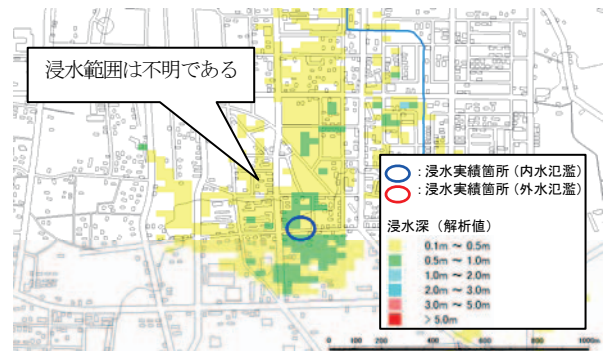


図-5 平成20年8月洪水の実績氾濫箇所との比較

験しており、この豪雨も対象にした。なお、福井県降雨強度式（奥越山間部）における200年確率の24時間雨量544mmは概ねこの豪雨の24時間最大雨量564mmと一致している。

以上の福井県降雨強度式、周辺の発生した最大雨域からは中央集中型波形を設定し、奥越豪雨からは流域平均雨量を設定し、これらの降雨量から合成合理式で算定した上流端上流域の流量を与えて氾濫解析を行った。

b) 堤内地の設定

本研究では、25m四方メッシュで支配方式を差別化した。25mメッシュ平均地盤高は、レーザプロファイラーの5mメッシュ標高値から算定した。

堤内地における氾濫流を阻害する構造物については、道路、鉄道、支川堤防を盛土構造物として設定した。なお、メッシュが細密であるため、レーザプロファイラーのデータと比較し、地盤高で反映されている場合については特段盛土として設定はしていない。また、文献9)を参考に、カルバートといった氾濫流が通過する構造物はモデルの中に組み入れた。

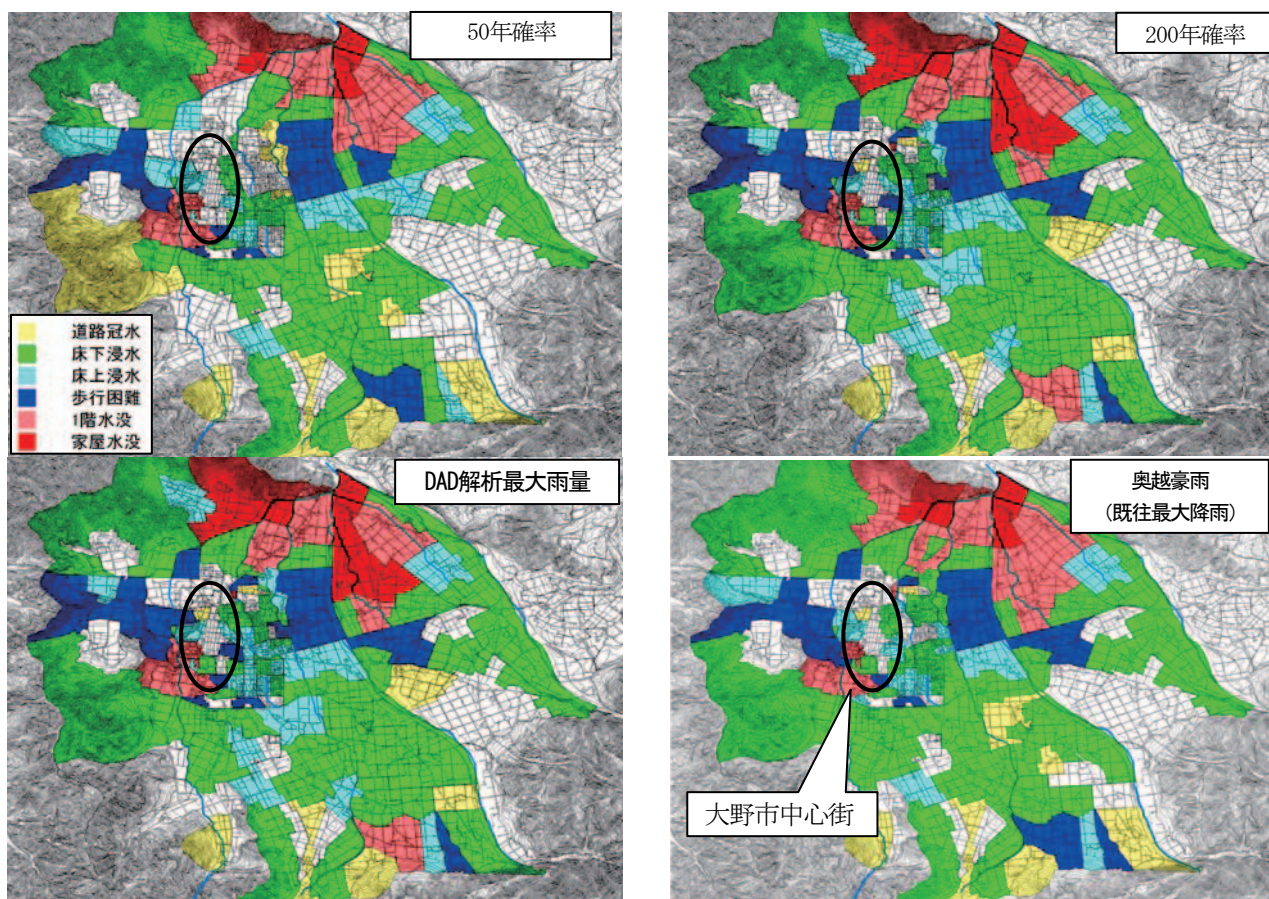


図-6 降雨外力毎の地区別の最大氾濫リスク

底面粗度係数を算出するために用いる土地利用は、総務省統計局・統計センターが定める地域メッシュ単位で土地利用状況が整理されている土地利用メッシュ情報を利用した。また、メッシュ内の建物占有率は、国土地理院発行の国土基盤地図情報に含まれている建物の外形データを利用して求めた。

河道については、平成16年の福井豪雨後に改修された河道の平成17年度測量断面⁹⁾、雨水排水路の断面は、雨水排水路系統を基に、水路断面を簡易測量した結果から設定した。河道と雨水排水路の接続については、河道水位が雨水排水路の水位よりも高くなる条件で、樋門からの逆流を防ぐために全閉条件として計算を行った。

河川堤防の破堤条件は、浸水想定区域図作成時の破堤の設定条件¹⁰⁾とは異なり、堤防満杯となった地点から順次破堤させる条件とした。

(4) 既往出水でのモデルの検証

氾濫解析モデルを大野市に適用するにあたり、既往出水での精度検証を行った。対象にした降雨は、平成16年7月福井豪雨、平成20年8月28日の局地的豪雨であり、これら降雨の実績レーダ雨量をメッシュ単位で与え、氾濫解析から検証を行った。これらの豪雨による氾濫の特徴を以下に示す。

- ・清滝川、赤根川、日詰川で、平成7年7月14日出水、平成16年7月18日出水（福井豪雨）で外水氾濫が生じている。この時の降雨は、時間雨量40mm以下、累加雨

量110mm以上で外水氾濫が発生した。

- ・平成20年8月28日の局地的な豪雨では、降雨継続時間が短く時間雨量57mm、累加雨量が78mmといった累加雨量が少ない降雨であった。そのため、清滝川中流部で内水氾濫が発生した。

図-4には、平成16年福井豪雨の再現計算結果を示す。これによれば、実際の浸水深は不明ではあるが、赤根川の外水氾濫による浸水実績範囲と概ね一致している。さらには、内水被害の発生範囲についても同様に再現しているものと考えられる。また、平成20年8月については、図-5に示すように、内水被害が発生した地域での計算結果は、再現しているものと考えられる。

このような内外水氾濫をシミュレートできるモデルを構築し、想定した最大降雨などの外力に対する氾濫解析を実施した。

4. 氾濫リスクの評価

本研究では、瀧等の研究¹¹⁾を参考にリスク評価を行った。すなわち、基盤地図情報からメッシュ内の家屋宅盤高と道路高を識別し、地区内の最低地盤高に対して浸水深、流速および流体力の評価を行った。

表-1は、発生する浸水被害の分類を示したものである。また、歩行困難となる状態については、須賀ら¹⁴⁾による水深・身長比と流速の関係から見た水中での歩行可能領域を用いるものとした。



図-7 赤根川沿いの人的被害の発生が予想される地区における浸水被害の時間的変化



図-8 河川合流部の人的被害の発生が予想される地区における浸水被害の時間的変化

表-1 氾濫解析結果に対する被害の分類

氾濫計算結果		被害内容	備考
項目	しきい値		
浸水深	0.2m超過	道路冠水	
	0.2m以上0.5m未満	床下浸水	
	0.5m超過	床上浸水	
	1.0m以上	1階水没	
	3.0m超過 ¹²⁾	家屋水没	人的被害
	5.0m超過	家屋完全水没	人的被害
浸水深と流速	歩行可能領域を超過	歩行困難	
流体力	2.5m ³ /s ² 超過 ¹³⁾	木造家屋流失	人的被害

図-6には、福井県降雨強度式の超過確率50年相当、超過確率200年相当、DAD解析による最大雨量（総雨量492mm/24hr、最大時間雨量134mm）および奥越豪雨での氾濫リスクを評価したものを示す。

これによれば、対象範囲で人的リスクが発生する可能性がある地区は複数河川の合流点の周辺で発生することがわかる。これは今回事例として示した特別警報を越えるような降雨・洪水の場合、警戒すべき区域であることを示唆するものである。一方で、真名川の支川である清滝川、赤根川、木瓜川、日詰川においては、降雨の規模に応じて越水破堤によりリスクが増大していくことがわかる。さらに、最大級の降雨の場合、特別警報の発表や、気象予報で大方の外力を把握することができる。このような事態に備えて、最も警戒しかつ避難所への避難をすべき地域や、垂直避難でも問題が発生しない地域など、色分けが可能である。また、大野市において最大級の降雨に伴う洪水が発生しても、大野市中心街（城下町、図

-6中黒丸）については、深刻な浸水被害が発生しないと考えられる地域も存在することが明らかとなった。

このような氾濫特性を踏まえると、地域毎に河川水位、雨量などの基礎情報を活用して、避難準備情報や避難勧告等を発令することが行政と住民の判断の効率性を向上させることが期待できる。

5. 避難判断・行動の想定方法について

前章では、各地区における最大浸水深や流速から、浸水被害リスクを評価した。整理したマップは、最大の被害という視点から作成されたものであり、時間軸上での情報ではない。したがって、このマップを用いて、個々の地区毎に対して、警戒することができる情報として活用することが期待される一方で、避難判断や行動を促進するには十分とは言えない。

そこで、先に示した地区毎のリスクマップから最大降雨で発生する可能性のある地区を対象にどのタイミングで行政から住民へ避難準備情報、避難勧告等を発令すべきかを検討した。この検討においては、降雨波形や河川水位の変化によって左右されるため、DAD解析による最大級の豪雨が襲来する場合を想定し、行政が住民・自主防災組織に対して発令する地区および時期を検討したものである。ここでは、この最大級豪雨の事例に基づき考察を行う。

まず、赤根川沿いのA～F町字における被害の発生の時間的変化と、それに対する近傍の水位観測所の水位、雨量を示している。これらの地区においては、1階水没が最大の浸水被害であり、直接的な人的被害はないという想定のもとで、発令のタイミングと発令の優先順位を

図-7に示す。これによれば、優先すべき地区を家屋1階水没の発生する4地区は、赤根川の氾濫によって急激にリスクが高まるため、近傍赤根川の基準水位に達した際に優先的に避難準備情報および避難勧告を発令する。一方で、その周辺の地区においては床上浸水程度であるため、その順位を下げている。また、周辺地区の住民が、もし逃げ遅れたとき、2階以上の建物に一時的に避難することも視野に入れた避難勧告を発令する必要性もあると考えられる。

次に、河川合流部で家屋水没の発生する可能性があるG～K町字を対象に検討した事例を示す。図-8には、図-7と同様に地区毎に整理したものを示す。この地区においては、地区近傍の河川の破堤による浸水のみならず、上流での破堤による氾濫流の伝搬や雨水の排水不良といった複合的に被害が発生するため、河川水位がピークを迎える前から道路冠水や床下浸水程度の被害が発生していることが想定されている。ピーク少し前からは、床上浸水、歩行困難という状況になり、すでにこの段階での水平避難は困難であり、危険を伴う避難になるものと考えられる。この地区での家屋水没・家屋流出といったリスクの発生は、これらの洪水到達時間や、氾濫流の到達時間程度の遅れが生じているため、ピークよりも遅れることが特徴である。

ここで対象にした人的被害の発生が想定される2地区については、避難が困難となる状態を想定し、事前に避難準備、避難勧告を発令することとし、予想される雨量や河川水位の状況を踏まえて、各河川の氾濫危険水位に達したときに、避難指示を発令するものとした。一方で、この2地区においては、予想される降雨規模によっては、逃げ遅れた際の垂直避難は避けなければならない地区であることから、避難勧告・指示の発令は他の地区よりも優先的に行う必要がある。

以上の整理は、最大級豪雨を想定したものであるが、累加雨量毎、時間雨量毎、地区毎といったリスクを評価したマップを作成することが必要と考えられる。すなわち、気象予警報や降雨予報値、河川情報と合わせて利用すれば、避難準備情報、避難勧告や指示の発令とそれにとりまな避難所の開設、道路冠水状況などを想定した様々な対応を支援できるものと期待できる。

6. まとめ

本研究では、現在では一般的になった氾濫解析モデルを、空間的解像度を向上させ、かつ内水氾濫を引き起こす雨水排水路の氾濫や河川への流入といった現象を追跡できるように拡張した。このモデルに与える外力としては、従来の浸水想定区域図の作成条件である河川計画の対象規模に加えて、それを上回る最大級の豪雨をDADや既往の実績降雨による氾濫解析を行った。その結果を分析した結果、最大級の豪雨が発生した場合、地域に応じた避難準備情報や避難勧告等の発令の優先順位や時期

を設定することができることを示した。今回の検討においては、シナリオの事例に対する考察を行ったが、外力の規模に応じた行政の対応をシミュレートすることで、より効率的な避難準備情報や避難勧告等の発令について議論することが可能であると考えられる。一方で、このような氾濫リスク情報を、住民や自主防災組織と共有し、具体的な避難判断や行動を行政からの情報と連動させて有機的に機能するための取り組みが必要と考えている。これにより、住民側も自主的な取り組みが促進されることが、地区防災計画¹⁵⁾といったものを作成していくことを契機として、日常的な防災を実現していくことが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局：平成25年の水害・土砂災害等の概要，2014.1
- 2) 福井県土木部：平成16年7月福井豪雨災害誌，2005.11
- 3) 福井県土木部：浸水想定区域図
<http://www.pref.fukui.lg.jp/doc/sabo/shinsuisoutei.html>
- 4) 国土技術政策総合研究所 水害研究室：NILIM2.0都市域氾濫解析モデル マニュアル，2008.7
- 5) 栗城稔・末次忠司・海野仁・田中義人・小林裕明：氾濫シミュレーション・マニュアル（案）ーシミュレーションの手引き及び新モデルの検証ー，建設省土木研究所資料 No.3400，1996.2.
- 6) 福井県：福井県の降雨強度式（HP），
<http://www.pref.fukui.jp/doc/kasen/seibi/koukyoudoshiki.html>
- 7) 坂井広正・田中耕司・中北英一・野稻誠・宮本哲明：レーダ雨量を用いたDAD解析と集中豪雨の発生頻度分析，河川技術論文集Vol.19，pp.301-306，2013.6
- 8) 九頭竜川水系治水百周年記念事業実行委員会：九頭竜川流域誌ー水との戦いそして共生ー，2000.
- 9) 福井県大野土木事務所：（県単）河川現況等データ整備事業 測量委託一級河川赤根川，2009.3
- 10) 国土交通省河川局治水課：中小河川浸水想定区域図作成の手引き，2009.6.
- 11) 瀧健太郎，松田哲裕，鶴飼絵美，小笠原豊，西畠照毅，中谷恵剛：中小河川群の氾濫域における減災型治水システムの設計，河川技術論文集，第16巻，pp.477-482，2010.
- 12) 佐藤智・今村文彦・首藤伸夫：洪水氾濫の数値解析および家屋被害についてー8610号台風による吉田川の場合ー，水理講演会論文集，Vol.33，pp.331-336，1989.
- 13) 河田恵昭・中川一：三隅川の洪水災害ー洪水氾濫と家屋の被害ー，京都大学防災研究所年報，第27号B-2,1894.
- 14) 利根川研究会：利根川の洪水，1995.
- 15) 内閣府（防災担当）：地区防災計画ガイドライン，2014.3
(2014. 4. 3受付)