

大規模洪水時における内外水同時氾濫解析モデルを用いた時空間的な浸水リスク評価

SPATIOTEMPORAL FLOOD RISK ASSESSMENT BY INNER AND RIVER WATER SIMULTANEOUS FLOOD ANALYSIS FOR LARGE SCALE FLOODS

米田 駿星¹・佐藤 誠¹・川村 育男¹
渡邊 一靖²・松本 勝治²・山田 朋人³

Hayase YONEDA, Makoto SATO Ikuo KAWAMURA
Kazunobu WATANABE, Shoji MATSUMOTO and Tomohito YAMADA

¹正会員 (株)建設技術研究所 北海道支社 河川室 (〒060-0003 札幌市中央区北3条西3丁目1-6)

²非会員 北海道開発局 札幌開発建設部 河川計画課 (〒060-8506 札幌市中央区北2条西19丁目)

³正会員 北海道大学准教授 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

In large-scale floods, small and medium rivers and sewers overflow before flooding of large rivers. The evacuation route of the residents might be underwater by the early overflow from small and medium rivers and sewers. In this study, inner and river water simultaneous inundation analysis model considering sewerage system is utilized. The characteristic of risk change in large scale flood is clarified by analyzing the flood risk spatiotemporally. It is revealed that flooding risk such as difficulty in evacuation by walking on the road around the shelter can happen due to flooding from small and medium rivers. We proposed soft measures such as evacuation plan considering early flood before the large-scale floods.

Key Words: Inner and river water simultaneous flood analysis, Risk assessment, large-scale floods

1. はじめに

近年, 日本全土において大規模洪水による被害が頻発している. 2015年9月の関東・東北豪雨災害では, 鬼怒川直轄管理区間で堤防が破堤し, 茨城県常総市の約1/3の面積(約40km²)が浸水する大規模洪水が発生した¹⁾. 鬼怒川破堤前に中小河川が氾濫し, 住民が鬼怒川の氾濫流と勘違いし避難判断を遅らせる要因となり逃げ遅れが発生した²⁾³⁾. 更に, 2016年8月の台風10号等により, 北海道・東北地方の中小河川の氾濫により死者が発生した⁴⁾. これらの被害を受け, 水防法改正や洪水浸水想定区域図の作成・公表などの水防災意識社会の再構築に向けての取組が実施されている.

大規模洪水時には, まず氾濫域の中小河川から氾濫が発生することが発生すると考えられ, 中小河川の氾濫も死者発生, 避難判断の遅延, 避難経路の制限などの浸水リスクを有している. しかしながら, 洪水時の浸水域を住民に伝える浸水想定区域図の作成では, 同流域に位置する河川でも河川管理者ごとに浸水域が検討されている.

そのため, 大規模洪水時の最大浸水域は捉えることができていないが, 時空間的な複数河川からの氾濫による浸水域の変化は十分に捉えることが出来ていない. 更に, 下水道が整備された市街部では, 下水道からの溢水による内水氾濫の発生も懸念される. 住民の家が複数河川の氾濫域内に位置し, 内水氾濫も発生する地域であれば大規模洪水時の避難判断時の浸水状況は複雑であり, 一般的な浸水想定図では避難経路等の判断が難しいことが考えられる. 住民が避難を判断するには, いつ避難するべきなのか, 避難所までのルートに危険はないのかなどの浸水リスクを事前に知ることが望ましいが, 外水及び内水氾濫を考慮した数値解析手法は研究⁵⁾⁶⁾されているが時空間的な浸水リスクの評価手法は確立されていない.

本研究は, 大規模洪水時の複雑な氾濫形態を把握し, 浸水リスクを分かり易く評価することを目的とした. そのために, 中小河川や下水道を一体として解析可能な内外水同時解析モデルを用いて, 水深と流速を用いた浸水リスクランクにより大規模洪水時における時空間的な浸水リスクを示したリスクマップを作成して, 浸水リスクを評価する手法を新たに提案した.

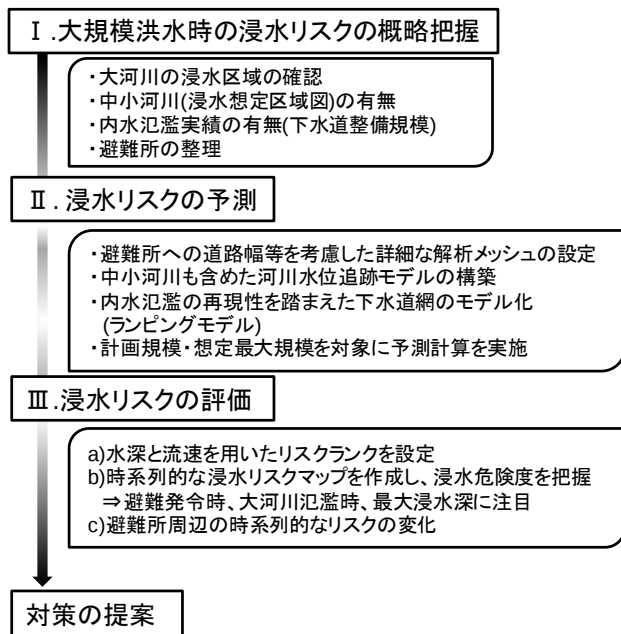


図-1 大規模洪水時における浸水リスク評価手法

2. 大規模洪水時における浸水リスク評価手法の提案

大規模洪水時は、床上浸水の発生、家屋倒壊、浸水期間の長期化等が発生するため、住民は避難警報の発令を受け、避難所への水平避難や垂直避難などの判断を迫られる。しかし、水平避難時に中小河川の溢水、下水道の内水氾濫が発生し、すでに浸水リスクの発現している場合がある。これらの氾濫で住民の避難経路が浸水し、避難が困難になることや浸水リスクの高い地点を通過する危険性が考えられる。本研究では、図-1に示すリスク評価法を提案した。以下に、当手法の具体的な検討方法を示す。

(1) 大規模洪水時の浸水リスクの概略把握

大規模洪水時の中小河川や下水道の浸水リスクの概略を把握し、対象とする河川・下水道を選定する。大規模洪水発生前の浸水リスクは、大河川の想定最大規模降雨等の浸水区域図による浸水域及び避難所等の浸水状況、中小河川の浸水想定区域図か浸水実績、内水氾濫実績等を参考に有無を把握する。内水氾濫実績が不足する場合は、下水道整備規模と対象降雨の波形・強度を比較することで浸水リスクを想定する。これらの情報から浸水リスクを概略把握する。

(2) 浸水リスクの予測

大規模洪水時の複雑な氾濫形態を把握するため、内外水同時解析モデルを構築し浸水解析を実施する。下水道解析モデルは、主要な管路をモデル化したランピングモデルを用いて構築し、浸水実績の再現性を踏まえ細かい

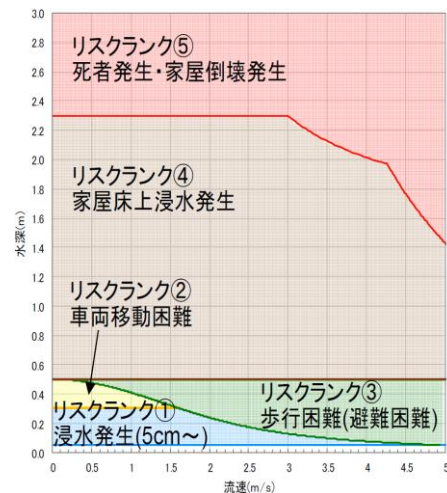


図-2 浸水による危険度を示したリスクランク

管路を追加することが効率的であると考えられる⁷⁾。構築した内外水同時解析モデルを用いて、浸水実績のある洪水を対象に浸水箇所の再現性を確認したうえで大規模洪水時の浸水解析を実施する。

(3) 浸水リスクの評価

大規模洪水時の浸水リスク評価を、浸水リスクランクを用いて実施する。以下に、浸水リスク評価における着目すべき事項を示す。

a) 浸水リスクランクの設定

一般的な浸水想定区域図では、浸水深を表示することで浸水リスクを表している。本検討では、浸水リスクを具体的に示すために水深と流速による浸水リスクランクを詳細に設定した⁸⁾(図-2)。

b) 浸水リスクの評価時点

予測解析結果から時空間的な浸水リスクの変化を確認することができる。山田らによる関東・東北豪雨災害時の浸水被災者へのアンケート調査結果では、住民が避難を判断するのは、行政機関から避難勧告の発令された時点と、大河川から氾濫が発生した時点が多いとされている³⁾。そのため、浸水リスクの評価時点は、(i)大河川の避難判断水位到達時点、(ii)大河川の氾濫(破堤)開始時点、(iii)最大浸水時点が重要であると考えられる。

c) 浸水リスクの評価方法

浸水リスク評価は、大河川氾濫前に避難所周辺や、大河川氾濫後に浸水深が大きくなる地区で車両移動困難以上のリスクとなっていないかが重要となる。住民が避難を開始する時点で、浸水が発生している場合は避難中の被災や避難に想定以上の時間を有するなどのリスクが考えられる。また、関東・東北豪雨災害では中小河川からの氾濫を大河川からの氾濫と勘違いし、逃げ遅れる事例が報告されており、早期に浸水が発生する地区にも注意が必要となる³⁾。

3. 札幌市街部を対象とした大規模洪水時の浸水リスクの評価

札幌市街部を対象に、大規模洪水時における時空間的な浸水リスク評価を実施した。

3.1 札幌市街部を対象とした浸水リスクの概略把握

札幌市街部は、豊平川左岸域に位置し創成川や新川等の中小河川に囲まれている（図-3）。札幌市内は管路延長約8,200kmの下水道が整備されており、豊平川からの氾濫だけではなく中小河川の溢水、下水道からの内水氾濫なども複雑な氾濫形態の要因と考えられる。

豊平川の想定最大規模降雨の浸水域は、左岸KP17.0破堤時に氾濫流は札幌市街部全域に広がる⁹⁾。札幌市洪水ハザードマップには内水氾濫危険区域が示されており¹⁰⁾、想定最大規模時の最大降雨強度70mm/hは、札幌市の下水道整備の計画規模35mm/hを上回っている。これら概略把握から豊平川大規模洪水時には、まず中小河川の溢水や内水氾濫等により浸水リスクが発生することが考えられる。

3.2 札幌市街を対象とした浸水リスクの予測

豊平川左岸域を対象に、内外水同時解析モデルを構築し、想定最大規模降雨時の氾濫解析を実施した。

(1) 内外水同時解析モデルの構築

札幌市街部の浸水リスクを予測するために、内外水同時解析を構築した。本モデルでは、流域からの河川流出量と下水道への雨水流出量を①河川流出（土研分布型流出モデル¹¹⁾）と③下水道雨水流出（修正RRL法¹²⁾）から算定した。その流出量を河道上流端及び下水道のマンホールと地表面に分離し与え、②河道追跡モデルと④下水道追跡モデルにより河道内及び下水道管路内の水位・流量を解析した。さらに、⑤氾濫モデルにより地表面の氾濫の広がりを解析した（図-4）。

河道追跡モデルは、石狩川及び豊平川に加え、指定区間、準用河川も一次元不定流解析モデル化した。雨水流出モデルは、地表面人孔に直接流出量を与える場合、人孔からの溢水が生じない限り、内水による浸水は表現できない。下水道に流入せず、地形的に窪地になっている箇所集まることで発生する浸水被害を再現するため、図-5に示すように「人孔に流入する雨量」と「地表に湛水する雨量」に分離して氾濫計算モデルに与えることで地表湛水を再現した⁸⁾。降雨量の分離は、下水道集水区間内の人孔（マンホール数）を集計し、マンホール数とマンホール径を乗じた分離係数を設定した。なお、マンホールへの流入量は、越流公式を用いて算定した。下水道雨水流出量は、φ600mm未満の管路を流下する時間を考慮するため、修正RRL法を用いて遅れ時間を考慮した流出量を算出した（図-6）。

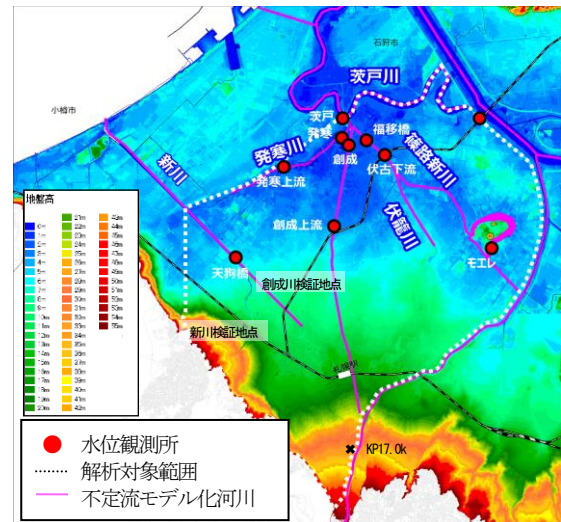


図-3 対象領域(豊平川左岸域)

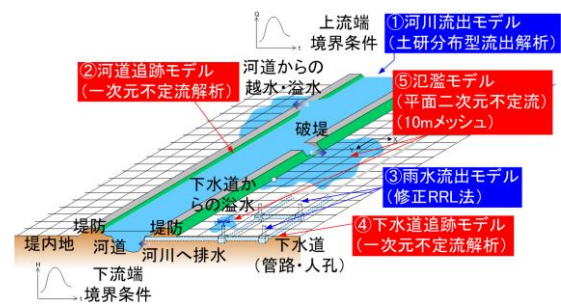


図-4 氾濫解析モデル概要図

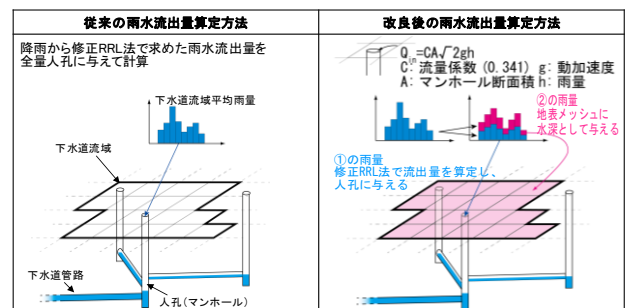


図-5 下水道への雨水流出量の算定方法

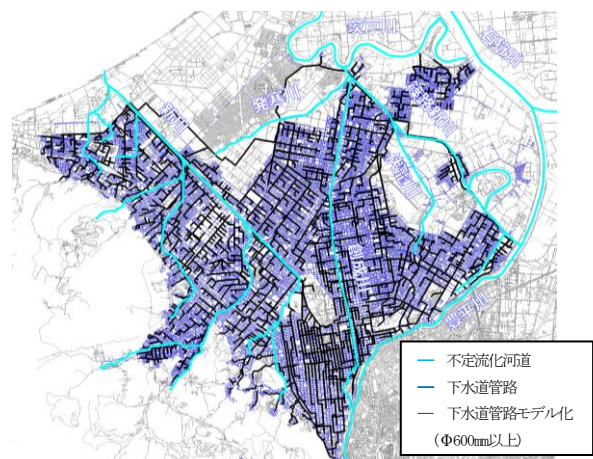


図-6 対象領域とモデル化した河道・下水道管路

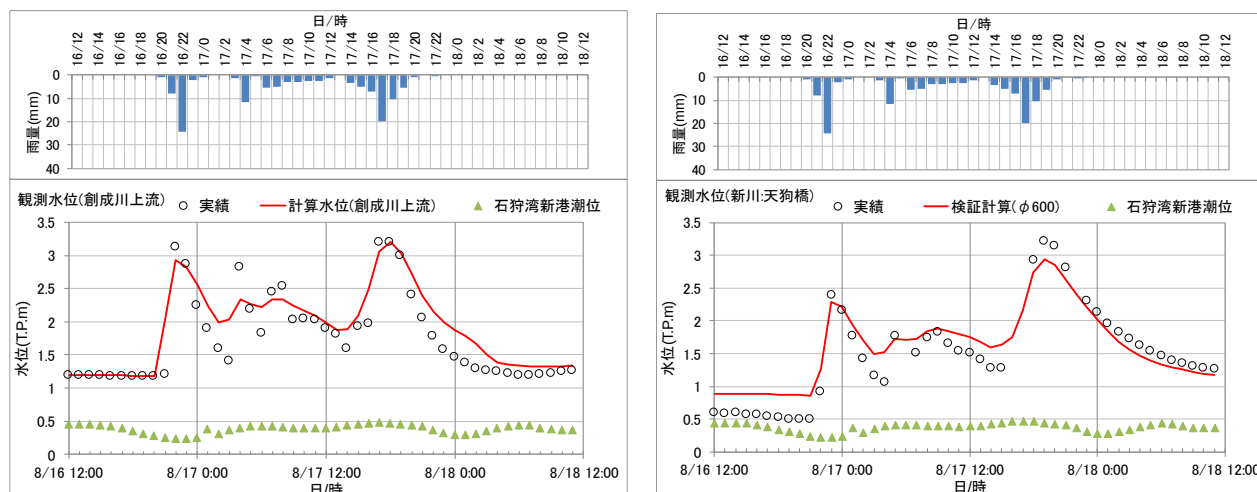


図-7 平成28年9月降雨での下水道排水中小河川の水位検証結果

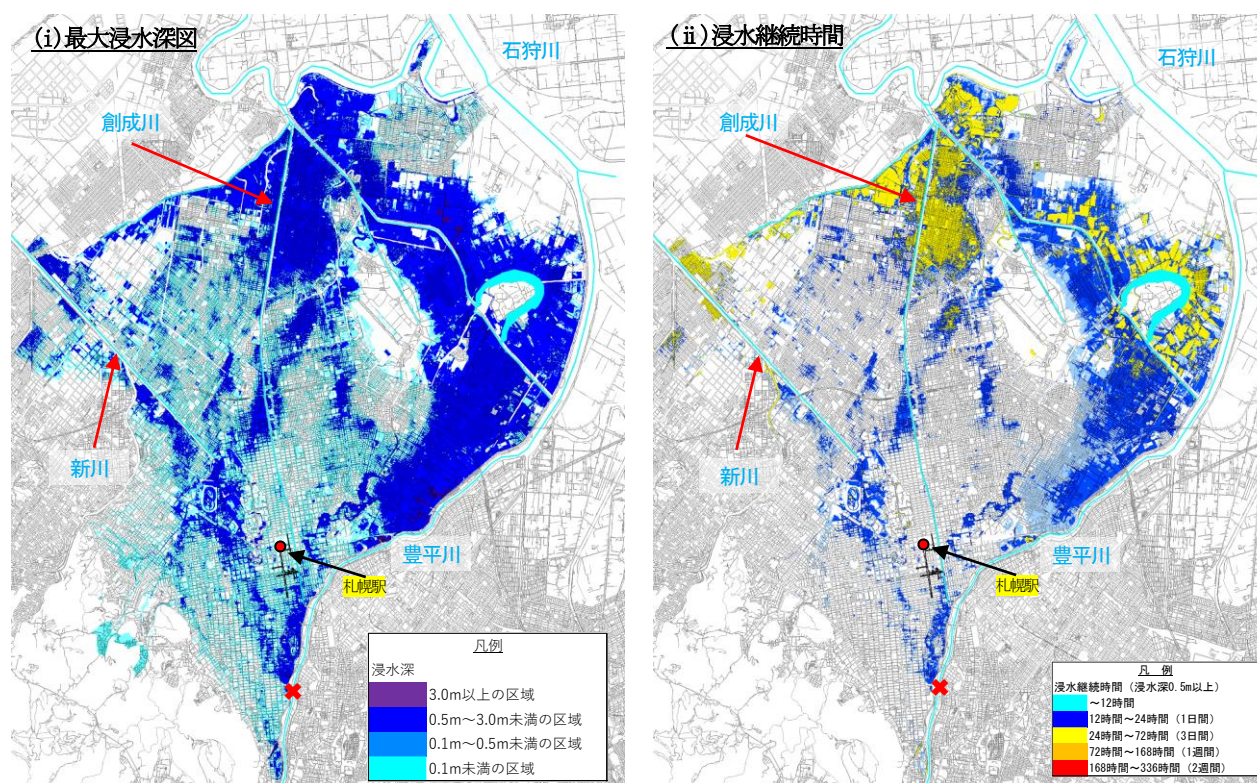


図-8 想定最大規模での浸水域(最大浸水深図と浸水継続時間)

検証計算は、モデル化した平成30年の下水道整備状況に近い平成28年9月降雨(最大降雨量約25mm/h)を対象とし、降雨量を地上雨量計観測値(気象庁)、河川下流端は観測潮位を境界条件として設定した。内水氾濫は下水排水河川水位が高くなり、排水が困難になることにより発生することがあるため、検証項目は下水道排水先の河川水位の再現性に着目し創成川及び新川の観測所(図-3)の観測水位と解析値を比較した。検証結果は図-7に示すように両河川の観測水位を高い精度で再現している。

(2) 札幌市街を対象とした浸水リスクの予測

札幌市街部での被害が最大となる想定最大規模降雨

(雁来地点上流域406mm/72時間)を対象とし、豊平川が破堤した場合の浸水リスク予測を実施した。降雨波形は、豊平川の河川整備基本方針の対象波形である昭和56年8月下旬降雨とした。破堤条件は札幌市街部へ氾濫流が最も流下するKP17.0地点とし、河道水位が計画高水位に達した時点で破堤するとした。想定最大規模降雨では、図-8に示すように札幌市街部全域が浸水し、破堤地点周辺、豊平川左岸下流部、創成川下流域では最大浸水深が1.5mを超過し、創成川下流域では浸水深50cm以上が1日以上継続する。両地区等では大規模洪水時に住民が避難を実施することが考えられ、避難勧告発令時にどのような浸水リスクが発生しているかを把握することが重要である。

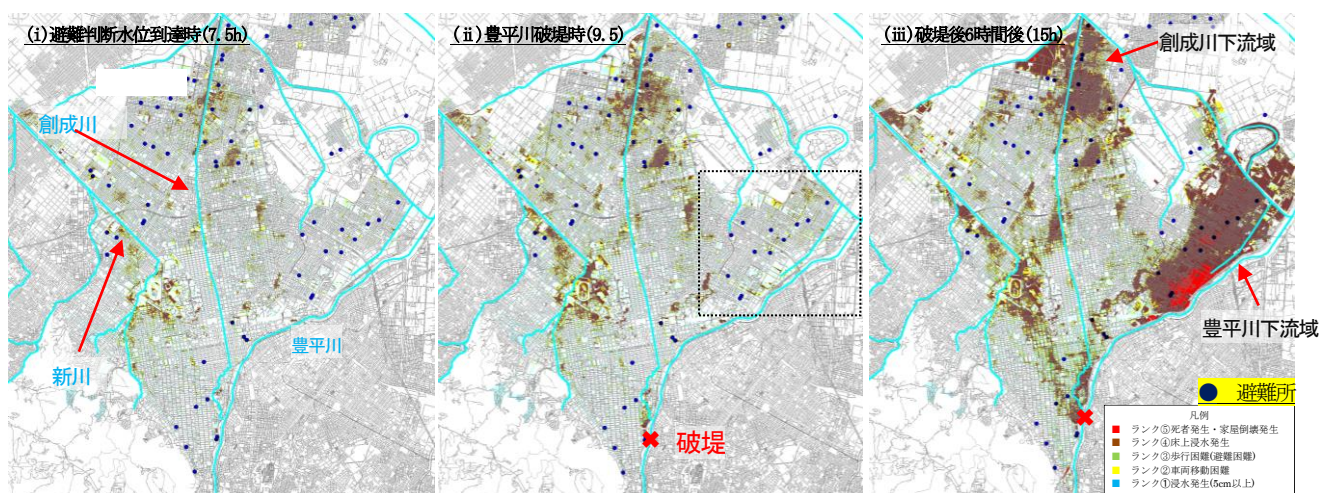


図-9 時空間的な浸水リスクマップの変化

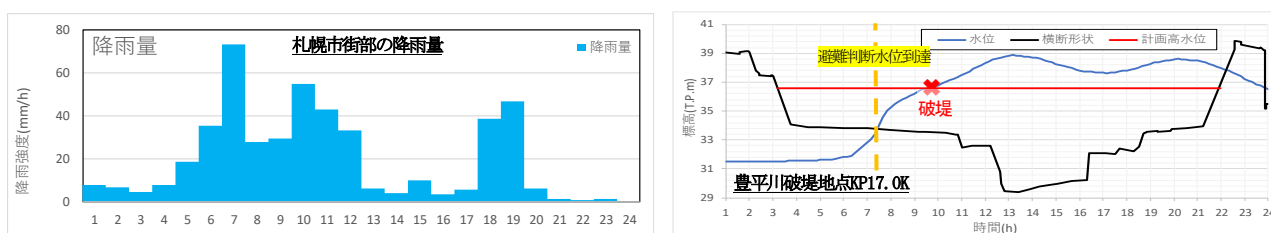


図-10 想定最大規模降雨時の札幌市街部の降雨量と豊平川破堤地点水位の時間変化

3.3 浸水リスク評価

想定最大規模降雨時の予測解析結果を用いて、時空間的な浸水リスクの変化を把握するために浸水リスクマップを作成した(図-9)。浸水リスクランクを用いることで、浸水により生じる避難困難などの浸水状況を住民でも分かり易く理解することができ、避難所の位置を示すことで住民の避難経路内の浸水リスクも確認することが可能となる。また、時系列的に整理することで浸水リスクの空間的な変化を把握できる。

図-9に示す時系列的な浸水リスクの変化に注目すると、避難勧告が発令される(i)避難判断水位到達時点(7.5h)で札幌市街部には図-10に示す70mm/hの降雨により、すでに創成川下流や新川上流で②車両移動困難以上のリスクが発生し、住民の避難判断や避難に影響を及ぼすことが考えられる。(ii)避難判断水位到達2時間後(9.5h)は豊平川破堤時点であり、創成川下流や豊平川下流では③歩行困難以上の区域が増加する。(i)時点で避難を開始した住民は浸水リスクを有する地点を通過して避難する危険性が考えられる。その後、(iii)豊平川の氾濫により市街部全域に浸水リスクが生じる。

浸水リスク評価から創成川下流域では、早期に創成川及び下水道からの浸水が発生し、その後豊平川破堤地点からの氾濫流が創成川を流下し、浸水域と浸水深が急増することを住民が認識する必要がある。また、浸水継続時間も24時間を超過することを踏まえ、水平避難・垂直避難の判断をする必要性が考えられる。

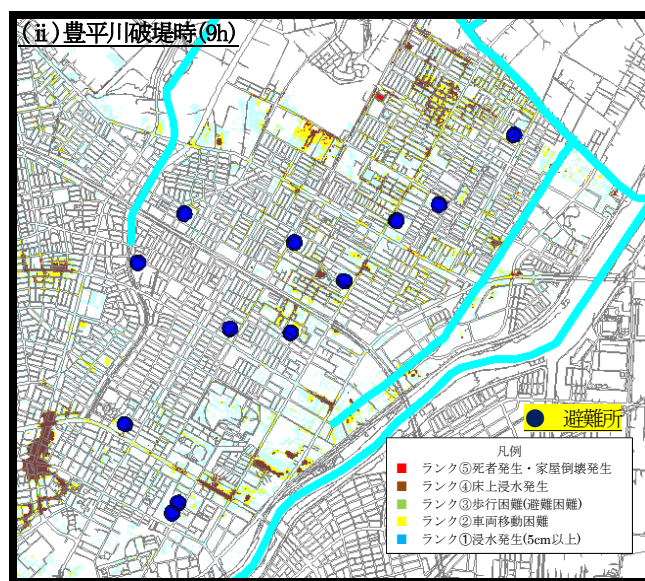


図-11 豊平川下流域の浸水リスクの発生状況

豊平川下流域では、図-11に示すように(ii)豊平川破堤時点で避難所周辺の道路で下水道の内水氾濫により②車両移動困難の浸水リスクランクが発生しており、豊平川氾濫に備えて避難する住民が移動中に避難困難となる危険性があることを示している。豊平川下流域は破堤後には河川からの越水により浸水深・流速ともに氾濫発生後に浸水リスクが急増する。浸水リスク評価から豊平川の大規模洪水時には、まず中小河川の溢水等による浸水リスクが発生する。

3.4 対策案の提案

大規模洪水時に住民が避難することを踏まえ、早期に中小河川からの溢水等により避難経路内の浸水が発生することを事前に住民へ伝えることが重要である。そのためには、中小河川からの溢水や内水氾濫リスクを示したリスクマップの作成などが効果的であると考えられる。図-12はリスクマップ作成例であり大規模洪水前の浸水リスクを住民に周知するために、中小河川や下水道の溢水による浸水リスクを示したものである。特に、浸水リスクが大規模洪水前に周囲に発生する避難所やアンダーパスも合わせて整理した。このリスクマップを用いて道路や避難所の浸水リスクを踏まえた避難経路の検討を実施する。また、大規模洪水時には、複数の河川・下水道から氾濫が発生するため、流域内の関係機関が一体となって対策を実施することが重要であると考えられる。

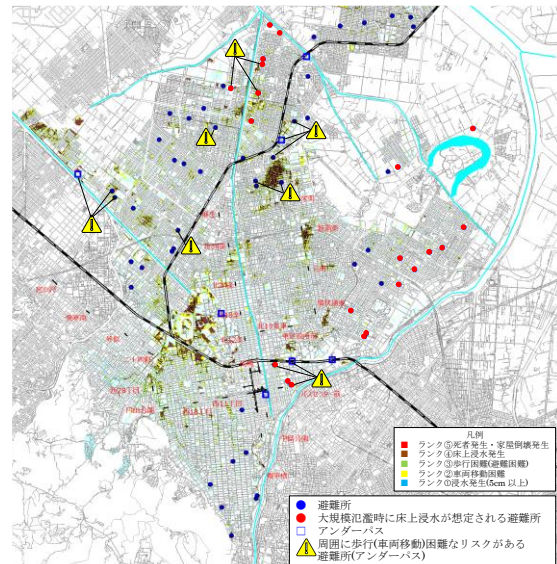


図-12 リスクマップの作成例

4. まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 大規模洪水時の複雑な氾濫形態を把握し、浸水リスクを評価する手法を提案した。本手法では、浸水リスクの時点毎の評価方法を示すことで分かり易く浸水リスクを評価する手法を提案した。
- (2) 豊平川の浸水想定区域図や下水道の整備計画規模を参考に札幌市街部を対象に大規模洪水時における浸水リスク評価を実施した。
- (3) 札幌市街部の複雑な氾濫形態を把握するため、中小河川から下水道までを対象とした内外水同時解析モデルを構築し、再現性を検証したうえで想定最大規模降雨時の予測解析を実施した。
- (4) 大規模洪水時における浸水リスク評価を実施し、降雨の早い段階で中小河川や下水道からの溢水による浸水リスクが発生し、住民の避難に影響を及ぼす可能性があることを明らかにした。本手法は、2015年9月の鬼怒川で見られたような複合氾濫に伴う避難判断遅れ等の被害発生過程を把握し、大規模洪水時の浸水リスクを踏まえた対策を立案する上で有効である。
- (5) 浸水リスク評価結果を踏まえ、大規模洪水時における住民の避難には、中小河川や下水道の溢水から大規模河川の破堤に至る浸水リスクの時間的変化を踏まえた避難計画が重要であることを示した。

本研究では、解析モデルの再現性検証は下水道排水先の河川水位により確認したが、今後は浸水実績のある降雨で浸水発生箇所の再現性も検証する必要がある。また、大規模洪水時における浸水リスクの評価は降雨波形により浸水リスクの発現タイミングや浸水リスクランクが変化することが考えられるため、降雨波形・分布の不確実性を踏まえたシナリオ設定しリスク評価を実施する¹³⁾。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局：「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.
- 2) 二瓶泰雄, 大槻順郎：平成27年9月関東・東北豪雨による関東地方災害調査報告書 4.3節 決壊・溢水状況, p.86, 2016.
- 3) 諸岡良優, 山田正ら：平成27年9月関東・東北豪雨災害時における住民の情報取得状況及び避難行動の実態調査, 河川技術論文集, Vol.22, p.345-350, 2016.
- 4) 国土交通省：平成28年に発生した水害の概要,2018
- 5) 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.
- 6) 田中耕司,中北英一ら：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, 河川技術論文集, Vol.20, 2014.
- 7) 日本下水道新技術機構：流出解析モデル利活用マニュアル(雨水対策における流出解析モデルの運用手引き),2017年3月.
- 8) 米田駿星, 山田朋人ら：降雨・流出の不確実性を考慮した内外水同時氾濫解析による浸水被害のリスク評価,土木学会論文集B1(水工学) Vo.74,No.5.
- 9) 国土交通省：地点別浸水シミュレーション検索システム, <https://suiboumap.gsi.go.jp/>
- 10) 札幌市：札幌市洪水ハザードマップ, https://www.city.sapporo.jp/kikikanri/higoro/fuusui/ssh_map.html
- 11) 安陪和雄, 大八木豊, 辻倉裕喜, 安田佳哉：分布型流出モデルの広域的適用, 水工学論文集, Vol. 46, pp. 247-252, 2002.
- 12) 山口高志, 松原重昭, 山守隆：都市における降雨流出調査, 第3報, 土木技術資料, 15-17, 1973.
- 13) 星野剛, 山田朋人ら：大量アンサンブル気候予測データを用いた大雨の時空間特性とその将来変化の分析, 水工学論文集, Vol. 74, pp. I_13-18, 2018.

(2019. 4. 2受付)