

9. 内外水同時解析を用いた浸水特性の分析

米田 駿星^{1,2}・佐藤 誠²・江口 陽祐²・山田 朋人³

¹正会員 北海道大学大学院 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)
E-mail:hs-yoneda@ctie.co.jp

²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)
E-mail:mkt-sato@ctie.co.jp, ys-eguchi@ctie.co.jp

³正会員 北海道大学教授 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)
E-mail:tomohito@eng.hokudai.ac.jp

河川が貫流し下水道が整備された市街地では、豪雨時に河川と下水道の氾濫が一体的に生じる恐れがある。そのため、浸水特性を把握するには、内水氾濫と外水氾濫を考慮する必要がある。本研究では、市街地を貫流する下水道排水河川を対象に、内外水同時解析による検証計算を実施し、浸水特性の分析を実施した。検証結果から対象降雨では、降雨ピーク時に河川が満水状況となっており、下水道の排水不良による内水氾濫が生じていたことが明らかになった。また、現地踏査と解析結果から降雨が地表に直接湛水することでも道路冠水が生じることを示した。更に、内水氾濫は、1つのマンホールの溢水によっても生じるスポット的な現象であることも現地踏査と解析の両面から示した。

Key Words: Inner and river water simultaneous flood analysis,

1. はじめに

近年、流域内の管理者・関係者が協働し、総合的かつ多層的に水害を軽減させる「流域治水」の取り組みが全国で実施されている¹⁾。流域における浸水要因は、河川からの越水・決壊による外水氾濫と下水道等からの溢水による内水氾濫がある。一般的に、河川と下水道は管理機関や部署が異なるために個別に浸水想定区域の検討や整備目標の検討等が実施されている。また、河川計画では数時間から数日単位の時間スケールを対象に議論するが、内水氾濫は数十分から数時間と時間スケールが異なる。そのため、流域治水を進めていくには、外水氾濫および内水氾濫を一体として捉える方法、その浸水被害を適切に評価し、協働していくことが重要である。

本研究は、下水道排水河川を対象に河川と下水道を一体で解く内外水同時解析モデルを用いて、内水氾濫および外水氾濫が生じた降雨を対象に解析モデルの検証計算を実施した。その後、各地点の浸水発生要因を分析し、河川と下水道の氾濫形態の時間・空間スケールの違いを示した。

2. 対象流域および対象降雨イベントの概要

本研究では、図-1に示す札幌市の市街地を貫流する中小河川の三里川を対象とした。三里川は、治水整備実施区間の約6.0km内に下水道吐口が約20箇所存在する下水

道排水河川である。三里川は上流に山地流出域を抱えておらず、降雨時の水源は下水道からの排水量のみとなる。三里川では、令和3年8月4日に流域内の雨量観測計で市の整備目標である35.0mm/hourを超過する、図-2に示す時間雨量59.0mm/hourを観測した。この降雨によって三里川流域では、外水氾濫と内水氾濫が発生した。著者は、この降雨時に三里川周辺において現地踏査を実施し、

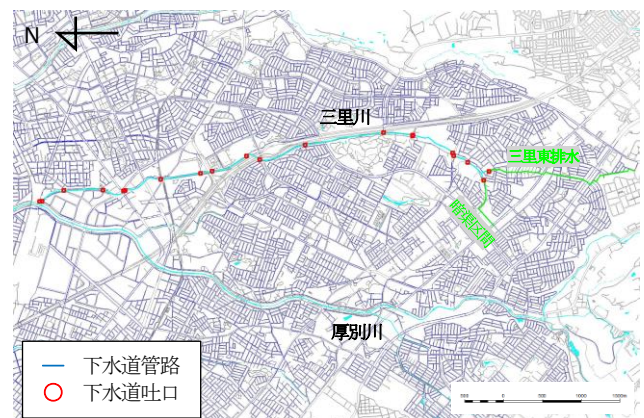


図-1 三里川流域の概要

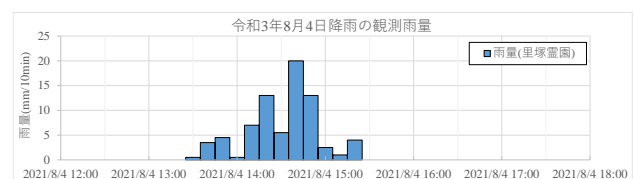


図-2 令和3年8月4日降雨の観測値(里塚壺園)

河川および内水氾濫の状況を確認した。図-3に対象降雨時の三里川および内水氾濫の発生状況を示す。三里川は、ピーク降雨観測直後の4日15時頃には堀込河道を満水で洪水流が流下していた。そのため、降雨ピーク時には下水道の排水は困難であったことが考えられる。また、流域内では複数の箇所内で内水氾濫が生じており、道路冠水やマンホールの溢水を現地踏査で確認した。更に、対象降雨時に著者が確認した内水氾濫発生位置と住民が札幌市に通報した浸水箇所を整理し、浸水被害箇所を整理した。本降雨による浸水被害は、三里川の越水による外水氾濫と、内水氾濫によって道路冠水や床上浸水および床下浸水が36地点で発生した。

3. 内外水同時解析モデルの構築

本研究では、図-4に示す河川と下水道を同時に解析する内外水同時解析モデルを構築した。本モデルは、下水道への雨水流出量を、修正RRL法による流出モデル(③雨水流出モデル)で算定する²⁾。これを下水道のマンホールに与え、④下水道追跡モデル(一次元不定流解析)で下水道管路内の水位・流量を算出する。次に、山地流域や下水道吐口からの流入量を境界条件に、②河道追跡モデル(一次元不定流解析)で河道内の水位・流量を解析する。河道水位が堤防や河岸高を超過した場合、

または下水道管路内の水位がマンホール地点の地盤高を超えた場合は、越流公式を用いて氾濫量を算出し地表に流量(ボリューム)として与える。そして、⑤氾濫モデルで地表面の氾濫流の広がり平面解析する。検証計算では、三里川および合流河川の厚別川をモデル化し、地表面の解析は直行座標系10mメッシュで構築した。下水道網は、概ね管径600m以上の管路をモデル化した。また、三里川の上流で流入する暗渠河川は、管路モデルとして考慮した。なお、内外水同時解析モデルの詳細な計算手法および定数は著者らの過去の研究論文に記載している³⁾。降雨外力の設定は、図-3に示すように札幌市のマルチセンサー(地上雨量計)の観測値をティーセン分割し、各下水道管の集水区に設定した。

4. 令和3年8月4日を対象した検証計算の実施

構築した内外水同時解析モデルを用いて、令和3年8月4日降雨の検証計算を実施した。検証項目は、三里川の観測水位の再現性と浸水実績箇所の浸水状況とした。三里川には、図-5に示すように1.2kと5.9kに水位計が設置されており観測水位と計算水位を比較した。図-5は、三里川の対象降雨における観測所の最大水位、下水道吐口、計算による最大水位の縦断面図である。観測所の最大水位と計算最大水位を比較すると上流の5.9k地点では概

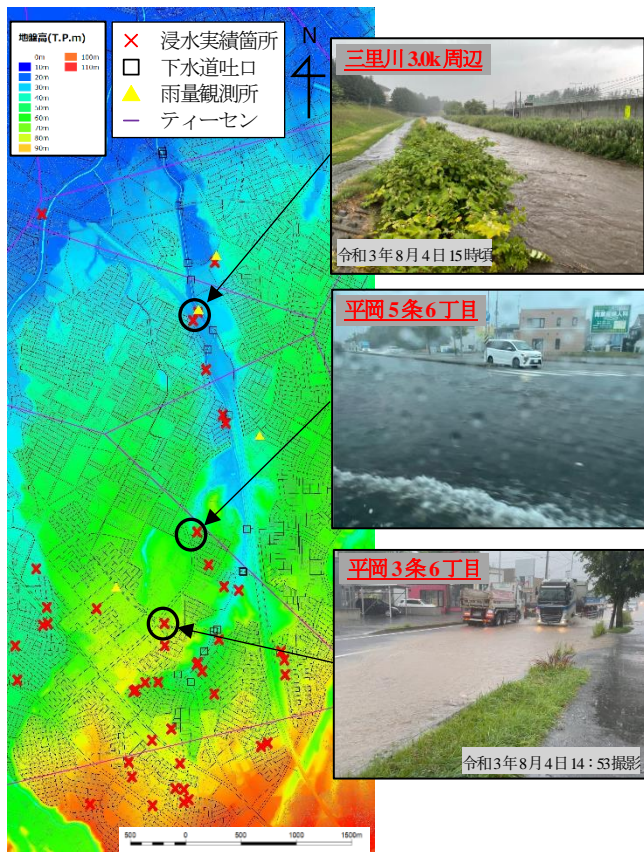


図-3 令和3年8月降雨における浸水被害の状況

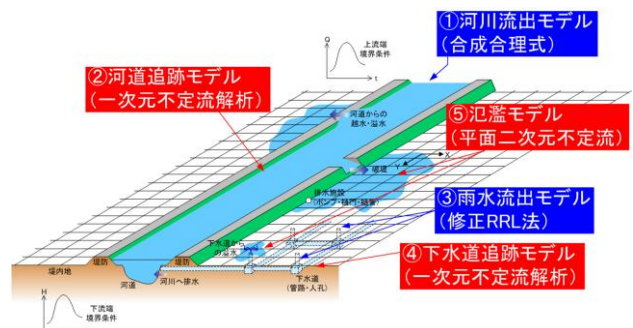


図-4 内外水同時解析モデルの概念図

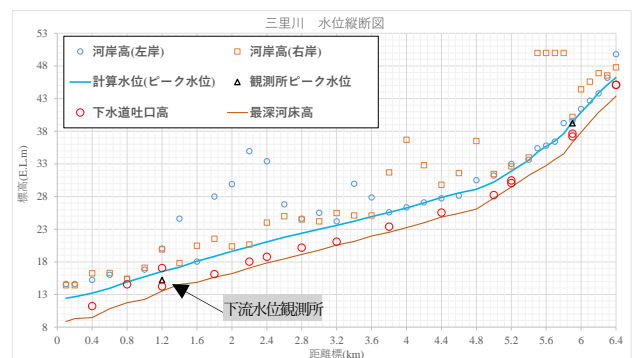


図-5 三里川の令和3年8月4日降雨での観測所水位と計算ピーク水位等の縦断面図

ね一致しているが、下流の1.2k地点では観測値が計算値より低い値を示している。図-6に各観測所の観測水位と計算水位の時系列変化の比較図を示す。5.9kの三里川上流観測点では、ピーク水位および水位波形を概ね再現していることを確認した。一方で、1.2kの下流地点では、水位波形は概ね一致しているがピーク水位に乖離が生じている。図-7は1.2k地点の水位計の観測断面を現地で確認したものである。1.2k地点は、河川の平面形状が著しく変化する箇所（図-8）に設置されており、一次元解析では水位変化の表現が難しい箇所であることが推測され、計算水位の再現性が低下したと考えられる。図-6と図-7から対象降雨では、僅か30分程度で三里川の水位が急激に上昇し、河川は満水となったことが分かる。そして、計算水位のピーク値と下水道吐口高を比較すると、ピーク水位は全吐口高を上回っている。これは、降雨時に下水道が排水不良状況であったことを示している。

次に、図-8に示すように浸水実績と氾濫解析での浸水状況を比較した。対象降雨で浸水被害は、著者の現地踏査と札幌市への通報履歴から整理すると36地点で発生していた。検証対象とする浸水被害は、降雨が直接湛水して浸水したと考えられるアンダーパス地点、現地踏査で氾濫流が雨水枡へ流入していた内水氾濫箇所等を除いた地点32地点とした。検証結果は、検証対象32地点の23地点（72%）で解析モデルで氾濫が発生した。浸水実績が密に発生している箇所（多くの住民から通報があった

箇所）では、解析モデルではすべて浸水が発生しており、概ね浸水特性を表現することができていることを示している。著者は、対象降雨時に現地において図-9に示すように道路冠水箇所を確認した。当地点では、道路冠水が発生しているが地表面の氾濫流は雨水枡へ勢い良く流

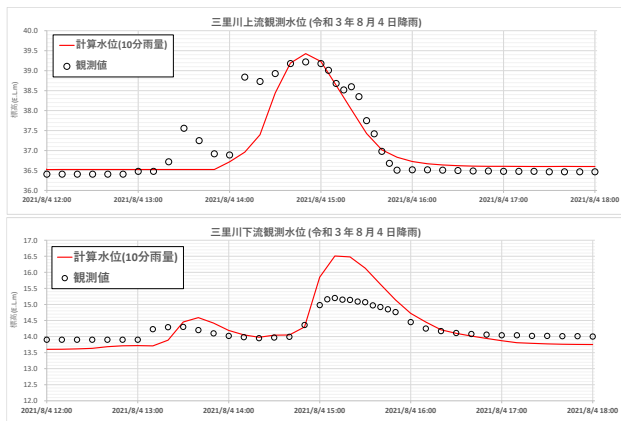


図-6 三里川の観測所水位の検証結果



図-7 三里川 1.2k の水位計の設置状況

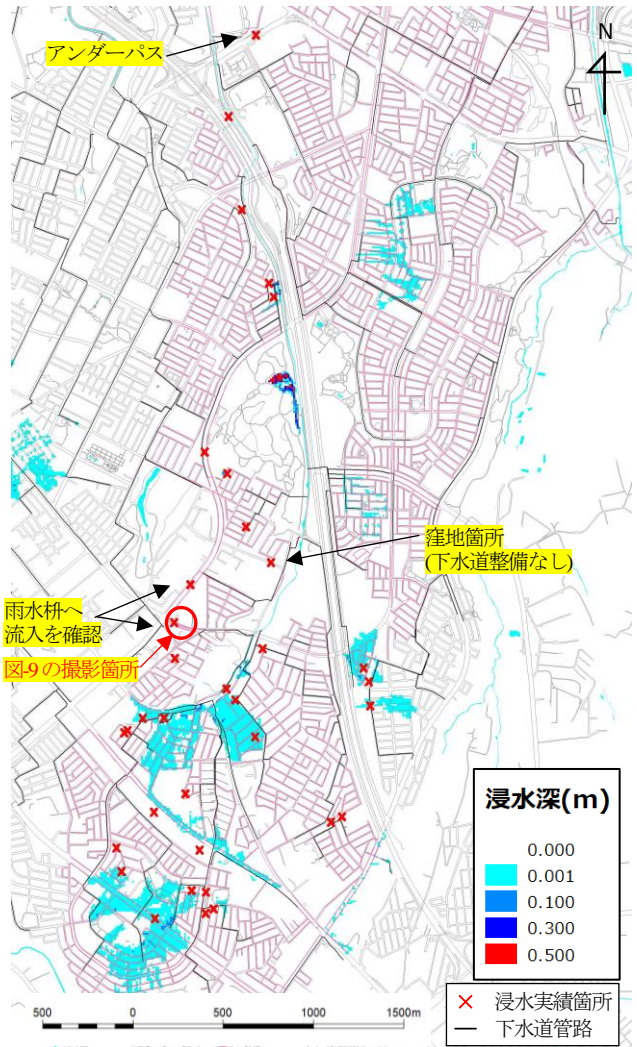


図-8 令和3年8月4日における浸水実績と解析結果の比較



図-9 令和3年8月4日における道路冠水箇所

下しており、降り注いだ降雨が地表の窪地に湛水することが要因で道路冠水に至ったことが推測できる。本モデルでは、マンホール地点の地盤高を下水道管内の水位が超過した場合のみ氾濫が発生する。そのため、地表に直接降り注いだ降雨による浸水は表現することが困難である。一方で、実現象では道路冠水が発生しており、浸水による危険性を有した箇所であることが分かる。例えば、対象地区の豪雨時の避難経路を検討するには、地表の窪地への湛水による道路冠水の影響も考慮する必要があることを示している。

5. 内外水同時解析モデルを用いた浸水特性の分析

構築した内外水同時解析モデルを用いて浸水特性の分析を実施した。初めに、降雨の時間解像度と浸水特性について分析を実施した。検証対象とした令和3年8月4日降雨波形を、図-10に示すように時間解像度の異なる10分雨量と時間雨量（10分値は時間雨量の6分の1の値）の2つの境界条件で氾濫解析を実施した。図-11は前述の異なる時間解像度での三里川水位観測所の水位の時間変化を比較したものである。降雨の時間解像度によってピーク水位と降雨波形に変化が生じており、時間雨量ではピーク水位が実績値に比べて低い値となっている。また、図-12に降雨の時間解像度の違いによる氾濫解析結果の比較図を示している。時間雨量を外力とした場合は、氾濫域が10分解像度で与えた場合の5分の1程度になっており浸水実績箇所の再現性も著しく低下している。

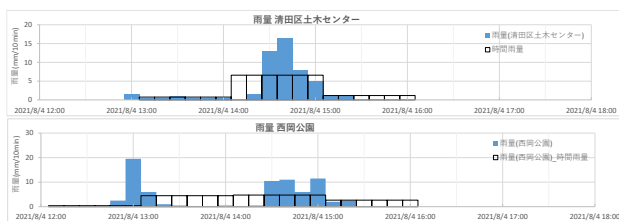


図-10 令和3年8月4日の10分雨量と時間雨量

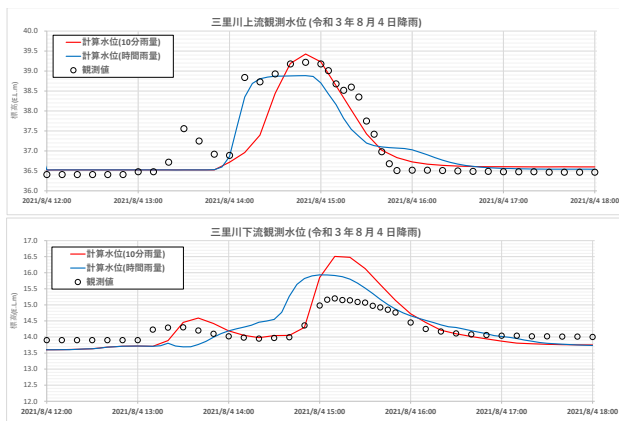


図-11 令和3年8月4日降雨を対象した降雨外力の時間

これらの結果から降雨流出が早い市街地の下水道排水先の中小河川では、降雨の時間解像度の違いによって河川水位の変動状況、氾濫発生状況が大きく異なることが明らかとなった。そのため、市街地を対象とした浸水特性の評価には、10分雨量を用いて検討すること、10分雨量の降雨波形の設定が重要であることを示した。

次に、図-13に令和3年8月4日降雨の検証計算におけるマンホール水位の空間分布を整理し、マンホールの溢水状況を分析した。検証計算で溢水したマンホールと浸水実績箇所を比較すると、浸水実績の近傍のマンホールで溢水が発生しており、浸水要因はマンホールの溢水に

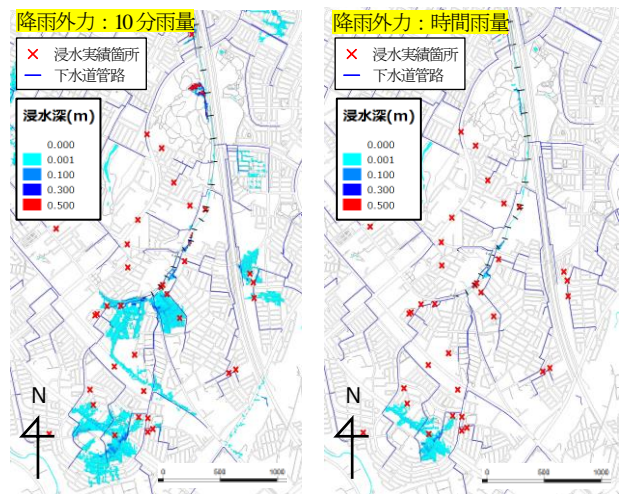


図-12 令和3年8月4日降雨を対象した降雨外力の時間スケールの違いによる氾濫状況の変化(左: 10分雨量 右: 時間雨量)

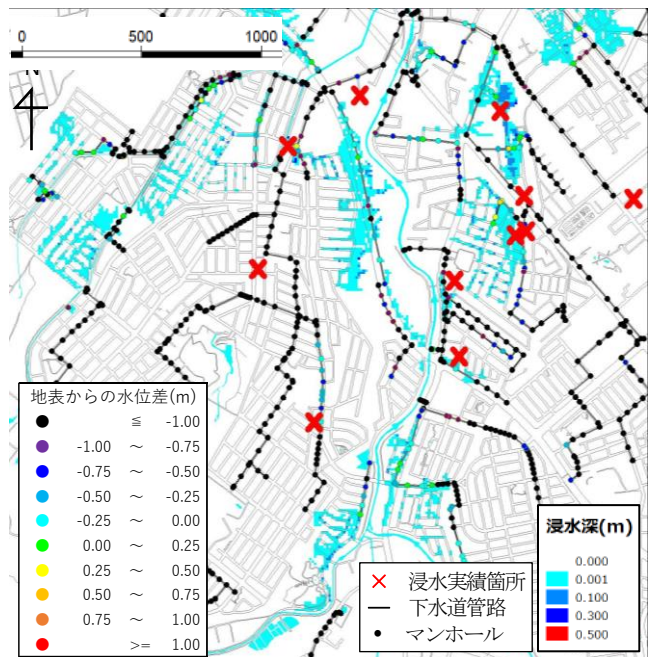


図-13 令和3年8月4日降雨の検証計算におけるマンホールの水位の空間分布(降雨外力: 10分雨量)

よるものである。一方で、浸水実績箇所の近傍のマンホールであっても、マンホールが溢水していない箇所も存在している。これらの地点の浸水発生要因は、モデル化していない管径 300mm 以下の枝管からの溢水、また降雨の窪地への湛水のどちらかによるものであると考えられる。このことから、内水氾濫の特性を網羅的に把握するには、管径 300mm 以下の管路のモデル化や地表への降雨の直接湛水による浸水も考慮する必要があることが分かる。また、溢水が発生した管路網に注目すると、縦断的に連続してマンホールから溢水している地点、スポット的に溢水が発生している地点（1つのマンホールのみから溢水）がある。これは、図-14 に示すように溢水管所のマンホール地点が周囲に比べて窪地となっており、1箇所のマンホールの溢水によって浸水が発生したものである。内水氾濫は、このような局所的・スポット的な氾濫が発生し、河川の流域規模の氾濫スケールと異なる現象である。さらに、同地点の計算水位がマンホール高を超過し、溢水した時間は僅か 20 分となっており内水氾濫の時間スケールの短さが示された。実際に、著者が対象降雨時に道路冠水が生じていた箇所も、数時間後には浸水していなかった。

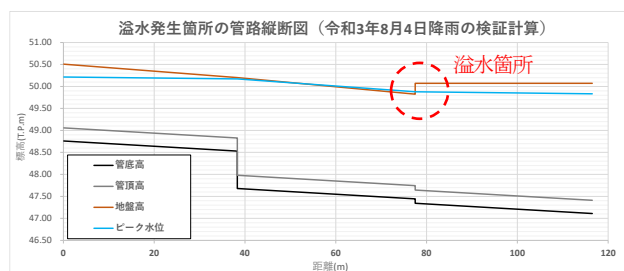


図-14 令和3年8月4日における溢水管所の下水道管路の水位縦断面図

6. 結論

本研究では、札幌市の市街部を貫流する三里川を対象に内外水同時解析による浸水特性の分析を実施した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- ・令和3年8月4日降雨での三里川およびその周辺の浸水状況を現地踏査において確認し、マンホールの溢水だけでなく、降雨の地表への直接湛水で道路冠水が発生していることを確認した。これは、豪雨時に下水道からの溢水だけでなく、降雨による地表の窪地への湛水も浸水リスクとなることを示した。
- ・令和3年8月4日降雨を対象に内外水同時解析を実施し、河川水位の時間変化から降雨ピーク付近で三里川は満水状態にあり、下水道の排水が困難であったことを示した。降雨流出が早い中小河川では、計画規模を上回る

降雨時には河川が満水時に降雨のピークが発生する危険性があることを示した。

- ・管路 600mm 以上の管路を対象として構築した内水氾濫モデルによって、検証降雨で発生した浸水実績の7割程度を表現することが可能であったことを示した。これは、全管路をモデル化対象としない簡略化モデルでも内水氾濫特性を概ね表現することが可能なことを示した。一方で、枝管からの内水氾濫や降雨による地表への直接湛水による浸水の評価には課題がある。
- ・内外水同時解析モデルを用いて、降雨外力の時間解像度による下水道排水先河川の水位変化と氾濫発生状況を比較し、10分雨量を用いることが河川水位のピーク値および氾濫発生再現性に大きく影響を示した。

- ・最後に、内外水同時解析による検証計算結果の分析から内水氾濫は、1つのマンホールの溢水によって生じる現象でもあり、空間・時間スケールともに、河川の流域規模のスケールと異なる浸水特性を持つことを示した。

これらのことは、流域単位の浸水特性を議論するうえで、河川と下水道の浸水特性の時間スケールおよび空間スケールの違いを示している。今後、流域治水を進めていくには、河川と下水道における浸水特性の時空間スケールの違いを理解し、各流域で一体的に議論できる時間・空間スケールを示すことや、時空間スケールに応じて考慮すべき事項を体系的に整理することが必要であると著者は考えている。

謝辞：本研究の遂行にあたり、札幌市下水道河川局事業推進部河川事業課よりデータの提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省社会資本整備審議会(2020)『気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～』
- 2) 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.
- 3) 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) Vol.74, No.5, I_1387-I_1392, 2018.
- 4) 米田駿星, 佐藤誠, 川村育男, 渡邊一靖, 松本, 勝治, 山田朋人: 大規模洪水時における内外水同時解析モデルを用いた時空間的な浸水リスク評価, 河川技術論文集, Vo.25.
- 5) 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, 2017年3月.