



Title	河川と下水道の一体的解析に基づく流域全体を俯瞰した水害リスク評価手法に関する研究
Author(s)	米田, 駿星
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16620号
Issue Date	2025-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16620
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98230
Type	doctoral thesis
File Information	Yoneda_Hayase.pdf, 全文



Development of Flood Risk Assessment Methods Based on Integrated River and
Sewer System Analysis from a Basin-Wide Perspective

河川と下水道の一体的解析に基づく流域全体を俯瞰した
水害リスク評価手法に関する研究

Hayase YONEDA

米田駿星

A Doctor Thesis

博士論文

北海道大学大学院工学院

on June 18, 2025

論文要旨

近年、我が国において河川や下水道の整備目標を超過する豪雨が頻発しており、流域内で生じる水害リスクの把握が課題となっている。この課題に対して、流域治水という取り組みが全国的に議論・検討されている。流域治水とは、流域を一体的に捉え俯瞰することで関係機関が協力し、治水を実施するというものである。流域内には、大河川、中小河川、下水道が存在するが、降雨、流出、流下、氾濫等の時空間スケールが異なり、浸水発生のメカニズムも異なる。また、河川と下水道は、管理機関が異なるために、整備規模や整備水準の違いも生じている。そのため、水害リスクを周知する浸水想定区域図やハザードマップは、個別に外力条件を設定しており、解析手法等も統一的に検討されていない。

我が国における河川と下水道を一体とした研究は、1999年福岡市の豪雨災害と2000年東海豪雨での都市部における下水道と河川の氾濫による人的被害を受けて活発に議論された。既往研究では個別の集水区に対する水害リスクの分析や予測解析となっており、流域スケールを対象とした河川と下水道を一体的に解析した事例は少ない。また、河川と下水道の両方を対象とした降雨外力の設定方法や水害リスクの周知に関して両面から議論したものではない。

本研究は、浸水発生の要因となる河川と下水道を一体的に取り扱うことで、流域内における水害リスクを予測し、その結果を俯瞰することで水害リスクを評価する手法を提案するものである。そのために、河川から下水道までを一体的に解析可能な浸水発生メカニズムに着目した内外水同時解析手法の開発を実施した。次に、河川から下水道までの浸水被害を踏まえた降雨外力の評価手法を提案した。そして、流域内の浸水被害の発生要因を内外水同時解析から可視化し、水理量に基づく水害リスクの評価手法を提案した。最後に、アンサンブル気候予測データを境界条件とした内外水同時解析を実施し、流域全体を俯瞰した水害リスク予測手法を開発した。

第二章は、流域内における浸水被害を引き起こす要因となる河川から下水道を一体的に解析する内外水同時解析手法の開発を実施した。解析手法の開発に当たり、札幌市内で発生した豪雨時における現地調査を実施し、下水道からの内水氾濫の状況、中小河川の急激な水位上昇を現地において調査した。また、複数の降雨波形を対象に検証計算を実施し、札幌圏域を対象とした流域スケールの高解像度の内外水同時解析モデルを構築した。現地調査で得られた知見をもとに、内外水同時解析モデルに対して、(1)窪地の浸水発生を考慮するための降雨の分離、(2)下水道からの氾濫量を枝管マンホールへ分配、(3)下水道の集水区単位での解析区域の拡大の改良を実施した。これにより、解析モデルの再現性の向上に加えて高速化が実現した。

第三章は、流域として大河川、中小河川、下水道の水害リスクの評価で対象とすべき降雨外力を抽出する手法を検討した。一般的に河川の整備水準を検討する基準は、1つの時間軸を用いた降雨の確率評価である。本研究では、降雨外力を2つの時間スケールに着目した複合確率を用いて評価する手法を提案した。本手法では、大河川の治水計画で用いられる数日単位の総雨量と洪水が基準地点に到達するまでの数時間の洪水到達時間内雨量の生起確率を掛け合わせた複合確率を算出し、総雨量、短時間総雨量の両軸から生起確率を相対評価した。この手法によって、大河川の氾濫に起因する数日単位の時間スケールと、中小河川や下水道の浸水被害に起因する数時間スケールの2つの軸で降雨を評価することが可能となった。

第四章は、内外水同時解析から算出される水量をもとに、水害リスクの分析と評価の方法を検討した。一般的に浸水想定区域図等に記載される最大浸水深のみでは、地先や地区において想定される水害リスクが地域住民に対してどれほどの危険度なのか不明確である。そのため、複数の既往研究やガイドライン等を参考に、水深と流速から避難困難等の水害リスクベースの評価を実施するリスクランクを提案した。次に、内外水同時解析に浸水発生要因別の追跡子を導入することで、各地先や地区の浸水発生要因を可視化する手法を開発した。内外水同時解析は、河川と下水道の氾濫を考慮することが可能だが、解析結果となる浸水深図は河川と下水道の氾濫流が混ざったものが示される。そのため、地先や地区の水害リスクの発生要因を明らかにするために、内外水同時解析に追跡子を導入し、浸水発生要因の可視化を時空間的に行い浸水被害の発生要因を明瞭に示した。

第五章は、起こり得る流域スケールでの水害リスクを予測するために、アンサンブル気候予測データの内外水同時解析への導入を検討し、未経験の降雨外力に対する水害リスクを予測した。まず、境界条件となるアンサンブル気候予測データの時空間解像度の違いによる水害リスクへの影響を分析した。アンサンブル気候予測データを想定した多様な時空間分布と解像度の降雨外力を作成し、内外水同時解析で各降雨外力での浸水域を算出した。その結果、水害リスクの発現は、降雨の空間解像度よりも時間解像度の影響を強く受けることを示した。最後に、第二章から第五章までに得られた知見を踏まえて、アンサンブル気候予測データから札幌市内で経験したことない降雨波形を抽出し、その降雨を対象とした水害リスクを内外水同時解析で予測した。

最後に、本研究では河川と下水道を一体とした内外水同時解析において降雨外力の時間解像度が水害リスクの発現に大きく影響することを示し、内外水同時解析への追跡子の導入による水害リスクの可視化に関する新たな手法を開発した。さらに、アンサンブル気候予測データを境界条件とした、流域全体の水害リスクの予測手法を示した。

ABSTRACT

This study proposes a method for evaluating flood risk in a watershed by comprehensively understanding the rivers and sewer systems that can cause flooding damage. To achieve this, we developed an integrated analysis method for flood damage mechanisms, which enable us to analyze everything from rivers to sewer systems simultaneously. Next, we proposed a method for evaluating rainfall forces based on flooding damage from large rivers to sewer systems. We identified the factors causing flooding damage within the watershed through simultaneous analysis of external and internal water and developed a flood risk assessment method based on hydraulic quantities. Finally, based on these research results, we presented a series of methods for predicting flood risk through simultaneous analysis of external and internal water using predicted rainfall data as the driving force.

In Chapter 2, we implemented the development of a simultaneous analysis method for both internal and external water systems, which integrates the analysis of rivers that cause flooding damage in the watershed with the sewer system. During the development of the analysis method, we conducted field surveys during heavy rainfall events that occurred in Sapporo City, where we confirmed the situations of internal flooding from the sewer systems and the rapid rise in water levels of small and medium-sized rivers. Based on the insights gained from this survey, we made improvements to the simultaneous analysis model for internal and external water by isolating rainfall to consider flooding occurrence in depressions, expanding the analysis areas on a watershed basis for the sewer systems, and refining the simplified evaluation of the distribution mechanisms of flood volumes from the sewer systems. As a result, we achieved not only improved reproducibility of the analysis model but also increased speed.

Chapter 3 examines methods for extracting rainfall external forces that should be considered for risk assessment of flooding in river basins. This study proposes a method to evaluate rainfall external forces using a composite probability focused on two time scales. In this method, the composite probability is calculated by multiplying the occurrence probabilities of the rainfall volume during the rainfall duration used in river planning and the rainfall volume during the time it takes for the flood to reach the reference point. The method evaluates the occurrence probability of rainfall from both total rainfall and short-duration total rainfall perspectives. This method proposes a framework for assessing rainfall along two axes: one based on time scales of several days, due to the flooding of large rivers, and another based on time scales of several hours, due to flooding damages in small and medium-sized rivers and sewage systems.

Chapter 4 examined methods for analyzing and evaluating flood risks based on hydraulic quantities calculated from simultaneous analyses of internal and external water. Drawing on multiple academic papers and guidelines, a risk map was proposed that implements flood risk evaluations based on evacuation difficulties by assessing water depth and flow velocity. Next, a method was developed to visualize the factors leading to flooding in various locations and districts by introducing tracking particles based on the causes of flooding within the simultaneous analysis of internal and external water. To clearly illustrate the factors causing flooding damage in various locations and districts, tracking particles were introduced into the simultaneous analysis, allowing for the visualization of flood causes to be more comprehensible. Finally, by superimposing the results of multiple rainfall forces and parameters using simultaneous analyses of internal and external water, a method was shown to extract dangerous areas on the risk map.

Chapter 5 organized the methods for introducing predicted rainfall data into the simultaneous analysis of internal and external water in order to forecast potential flooding damage on a watershed scale, and conducted predictions of flood risks against previously unencountered rainfall forces. Additionally, by clarifying the impact of differences in spatiotemporal scales during this process, a method for introduction was proposed. Diverse rainfall data with various spatiotemporal distributions and resolutions were created to assess the influence of differences in spatiotemporal distribution and resolution on flooding risks. As a result, it was indicated that, in terms of the flooding risk derived from simultaneous analysis of internal and external water, the impact of temporal resolution is stronger than that of spatial resolution. Finally, based on the findings from Chapters 2 to 5, unprecedented rainfall waveforms experienced within Sapporo City were extracted from predicted rainfall data, and flood risks from this rainfall were calculated using simultaneous analyses of internal and external water, clarifying the flood risks.

Contents

1. 序論.....	1-1
1.1 はじめに	1-2
1.2 本研究の背景と目的	1-3
1.3 研究の構成と本論文の構成	1-6
1.4 流域スケールでの水害リスクの議論について	1-7
1.5 流域スケールでの水害リスクの関係性について	1-11
1.6 本研究で用いる用語の解説	1-12
2. 高解像度内外水同時解析モデルの開発	2-1
2.1 内水解析と外水解析について	2-2
2.1.1 外水解析の既往研究等の整理	2-3
2.2 札幌圏域を対象とした内外水同時解析モデルの構築	2-4
2.2.1 氾濫解析モデルの概要	2-6
2.2.2 浸水解析モデルの基礎式	2-8
2.2.3 モデル化対象管路	2-21
2.2.4 下水道集水区の設定	2-23
2.2.5 下水道雨量流出モデルの構築	2-27
2.2.6 地表面氾濫計算モデルの構築	2-38
2.3 内外水同時解析モデルの精度検証	2-42
2.3.1 令和3年8月4月降雨を対象とした検証計算	2-43
2.3.2 氾濫発生要因に着目した内外水同時解析モデルの検証	2-70
2.3.3 浸水実績が生じた洪水に対する検証計算結果	2-83
2.4 高解像度内外水同時解析モデルの開発	2-89
2.4.1 内水氾濫時の現地調査結果に基づく氾濫モデルの改良	2-89
2.4.2 境界条件の設定	2-93
2.4.3 実時間以上の解析時間の高速化	2-94

3. 複合確率を用いた降雨外力評価方法の提案	3-1
3.1 気候変動予測降雨データ活用の背景	3-2
3.2 治水計画における降雨の確率手法の概要	3-3
3.3 複合確率を用いた降雨外力評価方法の提案	3-4
3.3.1 対象流域とアンサンブルデータの概要	3-6
3.3.2 洪水到達時間内雨量を用いた複合確率手法の提案	3-14
3.3.3 アンサンブルデータを活用した降雨確率の評価	3-22
3.3.4 複合確率による降雨外力評価方法の提案	3-27
3.4 複合確率の今後の課題	3-29
4. 内外水同時解析を用いた水害リスク評価手法の提案	4-1
4.1 浸水被害に基づく浸水リスクランクの提案	4-2
4.1.1 浸水による危険度を示したリスクランクの設定	4-4
4.1.2 浸水リスクランクを用いた時空間的な浸水リスク評価	4-12
4.2 浸水発生要因に着目した水害リスク評価手法の提案	4-22
4.2.1 浸水発生要因に着目したリスク評価手法の提案の背景	4-23
4.2.2 浸水発生要因の特定手法の提案	4-24
4.2.3 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（着色実験の実施）	4-27
4.2.4 内外水同時解析による浸水発生要因に着目した浸水被害特性の評価手法の提案	4-35
4.2.5 本研究を踏まえた内水対策効果の評価	4-39
4.2.6 豊平川の外水氾濫のみを対象とした浸水発生要因に着目した浸水被害特性の評価	4-40
4.3 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	4-57
4.3.1 不確実性を考慮した浸水危険度評価	4-58
4.3.2 被害発生特性分析	4-60
4.3.3 不確実性を考慮した浸水被害の変化	4-67
4.3.4 浸水危険度の評価と対策優先の設定手法の提案	4-72

5. 予測降雨データを活用した内外水同時解析による水害リスクの算出手法の提案5-1

5.1 予測降雨データの活用に向けた降雨の時空間解像度と浸水特性の関係性	5-2
5.1.1 予測降雨データの内外水同時解析への導入に向けての課題	5-2
5.1.2 対象とする空間スケールの整理	5-3
5.1.3 予測降雨の時空間分布の設定	5-4
5.1.4 5km メッシュ内の降雨の空間分布の設定	5-5
5.1.5 対象流域の概要	5-11
5.1.6 降雨の時空間解像と浸水特性の関係性	5-12
5.1.7 降雨の時空間解像と浸水特性の関係性のまとめ	5-17
5.2 予測降雨データを活用した内外水同時解析による水害リスクの算出手法の提案	5-18
5.2.1 降雨予測データの概要	5-19
5.2.2 対象降雨の抽出	5-21
5.2.3 対象降雨「HPB_m003_2010」の降雨による浸水被害の想定	5-23
5.2.4 対象降雨「HPB_m003_2010」の降雨の空間分布	5-25
5.2.5 各種境界条件用の流出量への変換	5-28
5.2.6 予測降雨データを用いた内外水同時解析の実施	5-31
5.2.7 水害リスクの予測	5-38

6. 結論..... 6-1

6.1 まとめ	6-1
---------------	-----

6.2 今後の展望	6-4
-----------------	-----

Acknowledgements

研究業績

References

第 1 章

序論

1.1 はじめに

近年、全国各地で河川や下水道からの氾濫によって甚大な浸水被害が多発しており、生じ得る水害リスクを予測し備える必要がある。流域内には、大河川、中小河川、下水道が存在するが、降雨、流出、流下、氾濫等の時空間スケールが異なり、浸水発生メカニズムも異なる。また、河川と下水道は、整備を実施する管理機関が異なるために、整備規模や整備水準（安全度）の違いも生じている。そのため、水害リスクを周知する浸水想定区域図やハザードマップは、個別に外力条件を設定しており、解析手法等も統一的に検討されていない。

氾濫解析における既往研究は、Lighthill ら(1955)の kinematic wave モデルによる一次元での洪水流解析にはじまる。その後、Xanthopoulos ら(1976)の diffusion wave モデルの二次元氾濫解析の開発、岩佐ら(1980)の dynamic wave モデルの浅水方程式による二次元氾濫解析などの研究成果によって洪水流の平面二次元氾濫解析が多くの河川や流域で実施されている。

河川と下水道を一体として取り扱う氾濫解析の研究は、我が国では 1999 年の福岡市や 2000 年の東海豪雨での都市部における下水道と河川の氾濫による人的被害を受けて活発に議論された。例えば、川池ら(2003)は寝屋川流域を、関根ら(2000)は横浜市を対象に河川と下水道を一体とした氾濫解析を実施している。また、海外においては、B. Dong ら(2022)はスコットランドの都市部を対象に河川と下水道を一体とした氾濫解析を実施し、解析から得られた水理量に基づく住民への避難行動への影響を検討している。さらに、C. Montalvo ら(2024)はスペインの都市部を対象に、仮想下水道網を用いた氾濫解析を複数洪水で実施し、実績の浸水被害と解析結果を比較することで都市部における河川と下水道を一体として取り扱う重要性を示した。

一方で、既往研究では個別の集水区に対する水害リスクの分析や予測解析となっており、流域スケールを対象とした河川と下水道を一体的に解析した事例は少ない。また、河川と下水道の両方を対象とした降雨外力の設定方法や水害リスクの周知に関して両面から議論したものではない。本研究では、流域内における浸水被害を引き起こす要因となる河川と下水道を流域スケールで一体的に捉え解析し、その結果を俯瞰することで、流域における水害リスク（危険性）を評価する手法を提案するものである。

1.2 本研究の背景と目的

本研究の背景は、平成 27 年 9 月に発生した鬼怒川の氾濫による甚大な浸水被害を著者が目の当たりにしたことが契機である。図 1.2.1 は、著者が鬼怒川決壊後に自身で撮影したものであり、当時の甚大な浸水被害を目の当たりにし「河川の氾濫」が引き起こすことによる人的被害や経済被害の大きさを実感した。この経験が、自身が土木技術者として「治水」に向かい合い、水害リスクの予測と、その解決策や対応方策を示していくのかを考える起点となった。

近年、「流域治水」という言葉（取り組み）が我が国において全国的に議論・検討されている。流域治水とは、流域を一体的に捉え関係機関が協力し対策を実施するというものである。著者は、土木技術者として「国の管理する大河川」、「県や市の管理する小河川」、「市町村の管理する下水道」の基本計画や整備方針、浸水被害の周知等の検討に携わった。この大河川、中小河川、下水道は、同一流域内に位置するが、流出・氾濫に関する時空間スケールが異なり、浸水発生メカニズムも異なる。加えて、各管理機関での河川・下水道の整備規模や整備水準（安全度）の違いも生じている。本来の「流域治水」を議論するうえでは、これらの流域内の河川から下水道を一体的に取り扱い、どこでいつ何が要因として浸水被害が発生し、それが地域住民へどの程度の水害リスクとなるかを解明し、流域としてどう整備・対応していくかを議論が必要であると著者は考えている。



図 1.2.1 鬼怒川の決壊による浸水状況(2015 年 9 月 11 日撮影)

この「流域治水」を議論するうえでは、対象とする流域においてどのような水害リスクが生じる可能性があるかを実態に即し議論・検討する必要があると考えている。我が国において、一般的に公開されている水害リスクを示す資料は、浸水（外水・内水）ハザードマップと浸水想定区域図である。著者は、浸水ハザードマップと浸水想定区域図の検討に関わっており、ここで2つの違いについて簡単に説明する。ハザードマップは、市町村が作成・公表しており、一般的な浸水（外水・内水）ハザードマップであれば、対象市町村内に生じる複数河川からの浸水想定区域を包絡したもの記載する。ハザードマップに記載する水害リスクは、浸水想定区域図が示している対象河川の浸水想定区域となっている。この浸水想定区域図は、各管理者が個別河川を対象に浸水想定区域検討の手引き等に準じて解析を実施したものである。ここで、注意すべき点は、各管理者が個別に実施しているということである。例えば、本研究で対象とする札幌圏域であれば、国が管理する一級河川直轄管理区間を持つ石狩川や豊平川等が札幌市を貫流している。次に、北海道が管理する指定区間等の月寒川や厚別川、札幌市が管理するうらうちない川や厚別西川等の準用河川という中小河川が位置する。さらには、札幌市のような都市部であれば、下水道の雨水排水網が整備されており、札幌市が管理する下水道管路が存在する。このように、豪雨時に氾濫の要因となる大河川、中小河川、下水道のそれぞれは管理機関が異なっており、個別に整備水準、浸水想定区域が検討されている。そのため、ハザードマップの記載される浸水想定区域は、個別に河川で検討された結果を包絡したものに基づいて作成される。

著者は、ハザードマップにおいて、個別河川で検討した浸水想定区域の結果を包絡し、水害リスクを周知する点については、安全側の条件となっており肯定的である。一方で、その地域の流域単位での水害リスクや浸水特性を議論するうえでは、豪雨時における浸水メカニズム(特性)を時空間的に把握し、どのような順序で浸水被害が生じ、何を優先して整備するかを議論する必要があると考えている。しかしながら、一般的に大河川、中小河川、下水道のそれぞれは管理機関が異なることから、大河川、中小河川、下水道を一体的に取り扱った検討や解析は実施されない。これは、流域単位での浸水解析を実施することは、大河川、中小河川、下水道までの時空間スケールの異なる現象をモデル化し、浸水解析を実施することが必要となる。大河川、中小河川、下水道をモデル化し、浸水解析を実施した事例は、近年では内外水一体型の水害リスクマップや既往研究でも実施されている。ただし、内外水一体型の水害リスクマップでは、内水解析を簡易的な手法を用いて実施しており、下水道内の水位解析は実施していない。また、既往研究で対象とされる河川や流域は、比較的流域スケールの小さい河川や排水区等が多く、本研究で対象とする札幌圏域という流域単位での事例は少ない。さらに、どのような外力を境界条件として設定し、検討するかという外力条件の課題となる。例えば、大河川が氾濫する想定最大規模降雨(1,000分の1確率以上)を対象に大河川、中小河川、下水道の氾濫を考慮して解析を実施しても、結果的に大河川の決壊や越水による氾濫域に包絡され、中小河川、下水道をモデル化した意味が薄れてしまう。そのため、大河川、中小河川、下水道をモデル化し、解析する外力をどう設定するか、設定した外力は、大河川、中小河川、下水道のそれぞれに対して、どのような外力条件であるかを示すことが必要である。

そして、大河川、中小河川、下水道まで対象として、解析した結果をどのように活用するかを検討する必要がある。これは、土木技術者として、その技術により得られた結果や知見を「どの様に社会に還元するか」という点である。本研究では、流域内における浸水被害を引き起こす要因となる河川と下水道を一体的に捉えることで、流域内における浸水リスクを評価する手法を提案するものである。そのために、河川から下水道までを一体的に解析可能な浸水被害のメカニズムに着目した内外水同時解析手法の開発を実施した。次に、大河川から下水道までの浸水被害を踏まえた降雨外力の評価手法を提案した。そして、流域内の浸水被害の要因を内外水同時解析から特定し、水理量に基づく水害リスクベースの評価手法を開発した。最後に、これらの研究成果をもとに、予測降雨データを外力とした内外水同時解析による水害リスクの予測手法を実施する一連の手法を示した。

1.3 研究の構成と本論文の構成

「流域治水」を議論するには、大河川から中小河川、そして下水道における各浸水メカニズムと特性を理解し、それらを一体的に解析し実体に即した浸水リスクの評価を実施する必要があると考えている。本研究では、大河川から中小河川、そして下水道を一体的に取り扱うことが可能な内外水同時解析手法を開発し、内水氾濫と外水氾濫を同時解析した結果の活用方法を提案した。また、内外水一体の外力を対象に浸水被害を予測するための外力の評価方法を、2つの時間スケールに着目した複合確率を用いて評価する手法も提案した。更に、今後、起こり得る流域スケールでの浸水被害を予測するために、気候変動予測降雨データの内外水同時解析への導入手法を整理し、その際の時空間スケールの違いによる影響を解明することで導入手法を提案した。

本研究では、図 1.3.1 に示す 3 つのテーマを課題として研究を実施した。テーマ①は、「流域内の水害リスク(浸水被害)要因の解明」である。テーマ①では、流域内の水害リスクを算出可能な内外水同時解析モデルの開発と内外水同時解析によって得られた解析結果を活用し、水害リスクを分析し、水害リスクの周知や整備方針の検討に活用する方法について検討した(第 2 章および第 4 章)。テーマ②は、内外水同時解析モデルの外力設定に活用する降雨外力の評価方法を検討した(第 3 章)。最後に、テーマ③では内外水同時解析モデルを用いて水害リスクを予測する手法を、予測降雨データを活用し実施する一連の手法を検討した(第 5 章)。第 6 章では、本論文の研究成果と今後の課題を示した。

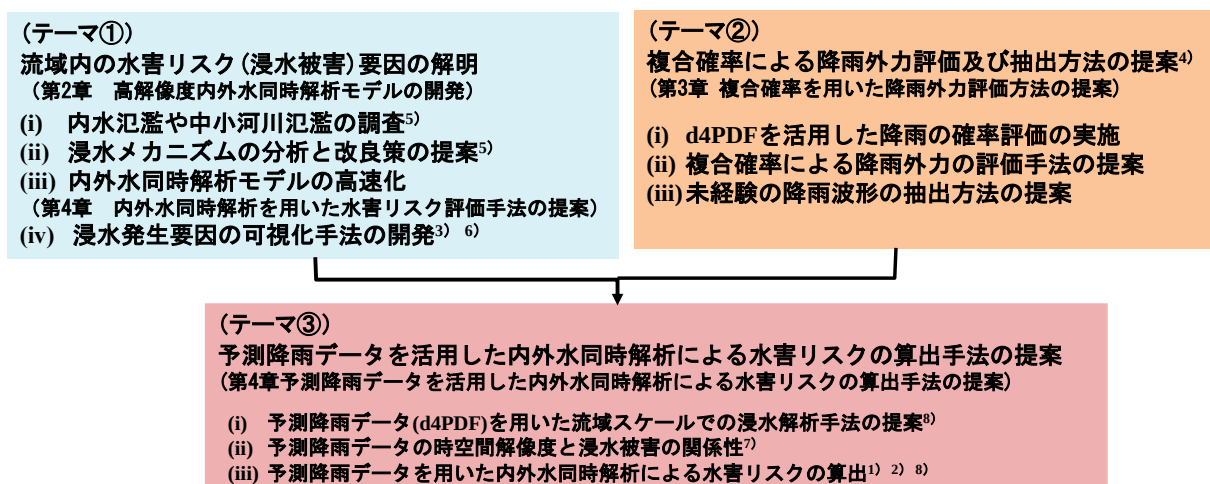


図 1.3.1 研究の構成

1.4 流域スケールでの水害リスクの議論について

著者は、土木技術者として河川計画の立案に携わっている。河川計画の立案及び整備は、各河川の管理機関が個別に実施している。例えば、鬼怒川の常総市を貫流する一級河川直轄管理区間であれば、国が計画の立案及び整備を実施する。そして、流域内を流れる中小河川、市街部に整備された下水道は市町村が立案及び整備を実施する。そのため、管理機関が異なるために、同流域内の河川であっても整備を検討する際の降雨の時空間スケール、解析手法、整備水準が異なる。

表 1.4.1 に大河川から中小河川、下水道のスケールを比較した一覧表を示す。これらの時空間スケールや各手法を統合的に考慮し、流域スケールでの水害リスクを包絡的に議論することで本来の流域治水を議論できると考えている。これらの時間スケールの違い踏まえて各現象を取り扱う必要がある。

表 1.4.1 に示す時間と空間スケールの異なる現象を内外水同時解析として、時間的に一体的に解析することは解析においては課題となる。氾濫解析は、河川と下水道の水位を算出し、その値に応じて氾濫量を求める。この水位を算出するには、大河川の数百メートル間隔、中小河川の数十メートル、下水道管路の数メートルを一体として解析し続けることが必要である。また、各現象で生じた氾濫量をどう複合的に処理し、地表面で一体的に解析するかを議論する必要がある。

流域スケールでの水害リスクを議論することは、外力条件だけでなく解析を実施するうえでの明確の手法や手引きは存在しないために、各氾濫現象を解明し、実態に即した手法の提案が必要となる。

表 1.4.1 大河川から中小河川、下水道の時空間スケールと解析手法の比較

項目	大河川	中小河川	下水道
空間スケール	数百km ²	数km ²	数ha
時間スケール	数日	数時間	数十分
管理機関	国	都道府県	市町村
治水安全度	1/100等	1/50等	1/10等
現象論スケール	決壊・越水(断面)	決壊・越水(断面)	地先(マンホール)
外力の考え方	実績(将来)	実績・中央集中	実績・中央集中
流出現象	貯留関数法等	合成合理式等	TA法等
水位解析	一次元解析等	一次元解析	一次元解析
氾濫解析	25～250m解像度	25～250m解像度	5～10m解像度

1.4.1 大河川を対象とした水害リスクの議論

本研究では、一級河川の直轄管理区間や二級河川の指定区間を持つ河川を大河川とした。大河川の水害リスクは、大河川自身からの堤防の決壊や堤防からの越水が主な水害リスクとなる。大河川の水害リスクは、平成 29 年の「水防法等の一部を改正する法律」によって、想定最大規模降雨を対象とした浸水想定区域図の公表が示され全国の河川において浸水想定区域図の改定が実施された。この浸水想定区域では、対象とする河川の外水氾濫を対象に破堤を考慮した氾濫解析を実施し、浸水想定区域を設定したものである。解析モデルは、「洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）（平成 27 年 7 月）」に準じて実施されている。一般的に、対象河川を一次元不定計算で解析を実施し、対象降雨外力に対して河川水位が計画高水位（H.W.L）等を超過した断面が決壊する条件となっている。大河川の流下能力の算出や洪水予測計算は、定期横断測量（数百メートル間隔）を用いて算出している。地表面は、平面二次元不定流解析となっており、メッシュ解像度は、25m メッシュで多くの河川では実施されている。

流域の空間スケールは、数百 km² となっており河川に応じて異なるが複数の市町村や都府県を流域に持つ河川も存在する。治水計画に用いられる時間スケール（計画の降雨継続時間）は、数日程度となる。大河川の治水安全度は、河川にもよるが 50 年から 200 年確率の降雨外力を整備目標として整備を実施している。水害リスクの観点では、現象論スケールは、決壊・越水という断面単位の現象が氾濫現象となる。

大河川の水害リスクを示す浸水想定区域図は、外水氾濫を対象に示されているために中小河川や下水道の氾濫は考慮されていない。著書は、本研究で対象とした札幌圏域以外にも土木技術者として、内外水同時解析による氾濫解析を実施している。この経験から大河川の氾濫域内の水害リスクの最大値を議論するのであれば、大河川の外水氾濫のみを対象とした手法は有効であると考えている。大河川のみを対象として氾濫解析では、実現象では支川（中小河川）や下水道の氾濫によって低減する流量をすべて大河川に与えることで大河川からの氾濫量を安全側に評価している。そのため、想定される大河川が抱える氾濫域の水害リスクの最大値を議論するには、適切な条件設定であると考えている。

一方で、この条件が「流域治水」の観点から議論する外力や解析結果としては課題を有していると考えている。想定最大規模の降雨は、1,000 年確率以上の確率雨量とされているため、中小河川や下水道の整備目標を遥かに超過している。このことは、著者が中小河川や下水道の管理者と議論した際に、「想定最大規模の降雨を対象と言われても、何もできないことができない」という言葉を聞く経験が何度もある。また、外水氾濫のみを対象としているために、実現象では生じる大河川の氾濫前に生じる中小河川や下水道からの氾濫は考慮されていない。そのため、想定最大規模や計画規模の時系列浸水深図等は、大河川から氾濫流がどう流下するかを図化したものであり、その降雨に対する水害リスクの時間変化を示したものではないと考えられる。

これらから、「流域治水」のためには水害リスクを実現象に即して誰かが検討する必要があると著者は考えている。

1.4.2 中小河川を対象とした水害リスクの議論

本研究では、準用河川から排水路等の河川を中小河川とした。中小河川の水害リスクは、自身からの堤防からの越水が主な水害リスクとなる。大河川の水害リスクは、平成 29 年の「水防法等の一部を改正する法律」によって、想定最大規模降雨を対象とした浸水想定区域図の公表が示され全国の河川において浸水想定区域図の改定が実施された。

この浸水想定区域では、対象とする河川の外水氾濫を対象に破堤を考慮した氾濫解析を実施し、浸水想定区域を設定したものである。解析モデルは、「中小河川洪水浸水想定区域図作成の手引き（第 2 版）（平成 28 年 8 月）」に準じて実施されている。この手引きの中では、対象河川の氾濫形態におうじて、地形条件等を考慮し、以下の 3 タイプに分類している。

- ①流下型氾濫：氾濫水が河川に沿って流下する氾濫であり、氾濫水位が河川の縦断方向に水面勾配を持つのが特徴。
- ②貯留型氾濫：氾濫水が閉鎖型水域に貯留される氾濫であり、その水域内での氾濫水位はほぼ同一となる。地形的に貯留型であっても河川の縦断方向に水面勾配を持つ場合は、流下型として評価する。
- ③拡散型氾濫：氾濫水が地形に応じて拡散する氾濫

上記の各氾濫形態を踏まえて、①の流下型氾濫では、河道と堤内地を一体とした断面で水位計算を実施する手法を、②貯留型氾濫では地形データをもとにした HV 式を用いる池モデルで実施される。③の拡散型氾濫では、「洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）（平成 27 年 7 月）」に準じて実施されている。ただし、想定最大規模以上では、中小河川の河道内で受け持つ流量が少ないために、河道と堤内地を一体として iRIC によって氾濫解析を実施する事例もある。

流域の空間スケールは、数十から数百 km² となっており河川に応じて異なるが複数の市町村を流域に持つ河川も存在する。治水計画に用いられる時間スケール(計画の降雨継続時間)は、数時間から 1 日程度となる。中小河川の治水安全度は、河川にもよるが 5 年から 20 年確率の降雨外力を整備目標として整備を実施している。

水害リスクの観点では、現象論スケールは、決壊・越水という断面単位の現象が氾濫現象となる。大河川に比べて中小河川では、堤防高と堤内地の比高差が小さく決壊による氾濫量の増加が少ない河川や堀込河道のために決壊が生じない河川もある。一方で、大河川の支川となっている中小河川では、洪水には大河川からの背水の影響で、氾濫が生じる水害リスクが存在する。そのため、個別河川のリスクだけでなく本川と支川で一体的に水害リスクを検討することも重要である。

1.4.3 下水道を対象とした水害リスクの議論

本研究では、下水道管路網（雨水幹線）を下水道とした。下水道の水害リスクは、マンホールや雨水枡からの溢水、排水能力の不足や排水不良による湛水が主な水害リスクとなる。下水道の水害リスクは、「内水浸水想定区域図作成の手引き(平成 27 年 7 月)」に準じて、想定最大規模降雨を対象に検討されている。この浸水想定区域では、対象とする下水道の内水氾濫を対象に氾濫解析を実施し、浸水想定区域を設定したものである。解析モデルは、「内水浸水想定区域図作成の手引き(平成 27 年 7 月)」に準じて実施されている。一般的に、雨水排水用に整備された管路網を一次元不定計算で解析を実施し、対象降雨外力に対して管内の水位が地表の地盤高を超過したマンホールや雨水排水から溢水する条件となっている。下水道の流下能力は、流量計算書等で算出されており、各管路単位で対象とする計画規模に対応した管路が整備されている。

雨水排水用に整備された管路網は、管径数メートルの雨水幹線から管径 300mm 程度の枝管まで存在する。内水氾濫解析では、この雨水管をどこまでモデル化するか議論があり、主要な管路のみを対象としてモデル化するランピングによって施設規模の小さい箇所（管径が小さい、集水域が小さい等）を省略し解析している。この解析対象とする管路網の解像度は、数 m から数十 m となっており、河川でモデル化する定期横断の空間スケールより詳細である。そのため、内水氾濫の解析では、地表面のメッシュ解像度は 5m から 10m という下水道管路網が位置する道路網を詳細に考慮可能な空間スケールとなる。

水害リスクの観点では、現象論スケールは、マンホールや雨水枡からの溢水というスポット的な現象が氾濫現象となる。

1.5 流域スケールでの水害リスクの関係性について

流域スケールでの水害リスクを議論するうえで、大河川、中小河川、下水道の3つの要素を一体的に議論する必要性を整理する必要がある。図 1.5.1 に大河川、中小河川、下水道に各要素の関係性を示す。大河川は、治水安全度が一番高いために、大河川の氾濫前の中小河川や下水道の氾濫による水害リスクが懸念される。また、大河川の水位で中小河川や下水道の排水有無が判断されるために、中小河川や下水道の氾濫発生要因となる。一方で、中小河川と下水道を経て大河川に降雨は流入するために、実現象では中小河川や下水道の氾濫による流量低減が生じる。

中小河川は、大河川の支川の場合は背水の影響を受けるため大河川の状態（水位）で流下能力が変化する。西日本豪雨では、「バックウォーター現象（背水）」によって支川で決壊が発生し、甚大な浸水被害が発生した。また、大河川よりも治水安全度が低いために大河川の氾濫前に中小河川が氾濫し、水害リスクの要因となる。そして、中小河川の水位で下水道の排水有無が判断されるために、下水道の氾濫の要因となる。一方で、下水道を経て中小河川に降雨は流入するために、実現象では下水道の氾濫による流量低減が生じる。

下水道は、大河川や中小河川の水位で排水有無を判断しており、吐口から自然排水に加えて雨水ポンプ場等を用いた排水を実施している。そのため、大河川や中小河川の状態（排水能力）が変化する。また、大河川よりも治水安全度が低いために、大河川の氾濫前に下水道からの溢水によって水害リスクが生じる。一方で、整備目標する時間スケールが時間雨量となっており、総雨量が多い洪水でも最大降雨強度が小さい洪水では、下水道から水害リスクは低くなる場合も想定される。

これらを踏まえて、大河川、中小河川、下水道のそれぞれは相互に水害リスクの発生に関係しており一体的な検討が必要であると著者は考えている。



図 1.5.1 大河川、中小河川、下水道の関係性の整理

1.6 本研究で用いる用語の解説

本研究では、流域内における様々な現象や既存の治水計画や水防計画で使用する用語を用いて検討を実施する。そのため、基本的な事項に関する

- ・ 一級河川直轄管理区間：国土交通省(国)が管理する河川の区間
- ・ 一級河川指定区間：都道府県（一部の区間は政令指定都市）が管理する河川の区間
- ・ 二級河川区間：都道府県（一部の区間は政令指定都市）が管理する河川の区間
- ・ 準用河川区間：市町村が管理する河川の区間
- ・ 普通河川区間：市町村が管理する河川の区間
- ・ 外水氾濫：河川水位が上昇することで堤防等からの越水や堤防からの決壊によって生じた氾濫
- ・ 内水氾濫：堤内地に位置する下水道や排水路からの溢水によって生じた氾濫
- ・ 計画規模降雨（L1）：河川や下水道の整備目標とし定めた降雨規模
- ・ 想定最大規模降雨（L2）：想定される最大規模の降雨.一般的に、洪水浸水想定区域の検討の手引きにおいて、DAD 解析による各地域での最大降雨量と 1,000 分の 1 確率の雨量の大きい方が採用されている。
- ・ 浸水想定区域図：水防法に基づき定められた想定最大規模や計画規模を対象とした浸水区域図
- ・ 洪水ハザードマップ：河川からの氾濫を対象に市町村が浸水域や避難所等を示すマップ
- ・ 内水ハザードマップ：下水道等からの氾濫を対象に市町村が浸水域や避難所等を示すマップ
- ・ 高水計画：降雨から河川への流出量までの検討（計画）を指す
- ・ 河道計画：河道内における検討（計画）を指す
- ・ 基本高水：洪水を防ぐための計画で対策の目標とする流量
- ・ 計画高水：基本高水に対して洪水調整施設を考慮した流量（河道が受け持つ流量）
- ・ 治水計画：本研究では、河川整備を実施するための計画（河川整備基本方針・河川整備計画）
- ・ 大河川：本研究では、一級河川の直轄管理区間や二級河川の指定区間を持つ河川
- ・ 中小河川：本研究では、準用河川から排水路等の河川
- ・ 下水道：本研究では、下水道管からの雨水排水施設（管路網）
- ・ 定期横断測量：河川内を定期的(数年単位)に実施される横断測量（数百メートル間隔）
- ・ 築堤：堤防が整備されている状態
- ・ 掘込河道：堤防が整備されていない河川（区間）

第 2 章

高解像度内外水同時解析モデルの開発

2. 高解像度内外水同時解析モデルの開発

本研究では、将来に発生する可能性のある浸水被害を内外水同時解析モデルによって算出することが目的の一つである。本研究は、様々な降雨外力に対して浸水被害を適切に評価することが可能な内外水同時解析モデルを構築することが課題である。著者は、既往研究において内外水同時解析モデルを構築しており、この既往モデルを基本に様々な観点から検証や分析を行い将来に発生し得る浸水被害を算出可能な内外水同時解析モデルを開発した。

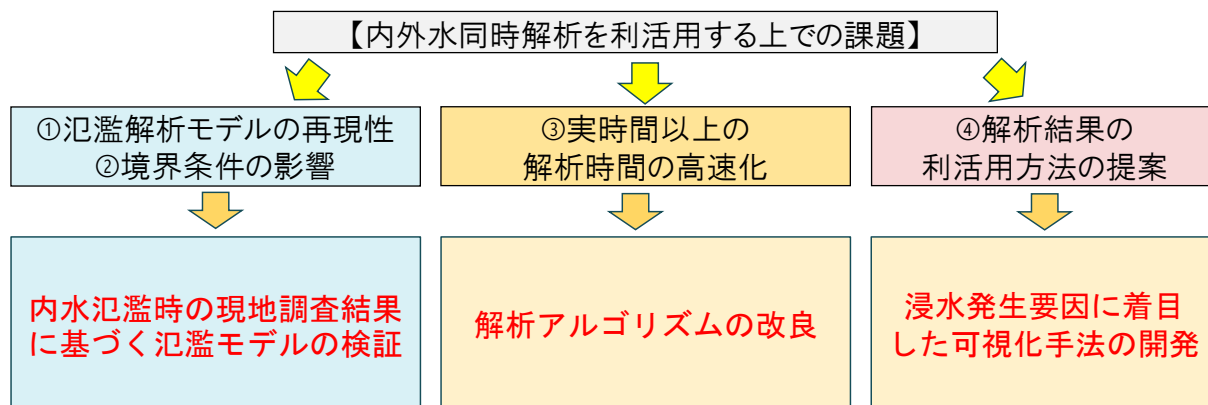


図 2.1 高解像度内外水同時解析モデルの開発の流れ

2.1 内水解析と外水解析について

本研究では、下水道の人孔(マンホール)からの溢水と河川からの越水(破堤)を同時に解析する手法を内外水同時解析とした。浸水被害の要因となる氾濫(川の水などが増して勢いよくあふれ出ること)は、一般的に内水氾濫と外水氾濫の2種類に分類されている。図2.1.1に内水氾濫と外水氾濫の概念図を示す。河川分野では、堤防に守られる市街地・田んぼ等を堤内地、河川内を堤外地として分類している。外水氾濫は河川の水位が上昇し堤内地に溢れ出る現象であり、内水氾濫は、一般的には降雨が排水量を超過し堤内地の排水河川や下水道から氾濫する現象である。本研究では、内水氾濫は「下水道水位が上昇し地表面に水が溢れ出る現象」として以後は示す。著者は、一般的な堤内地の排水河川(中小河川)等からの氾濫も含めた「内水氾濫」という表現は、堤防が整備されるような河川を基準とした場合の表現方法と認識している。近年の流域治水という観点では、大河川から中小河川までを1つの流域として考えており、中小河川や排水河川の氾濫も外水氾濫として取り扱うことを著者は考えている。

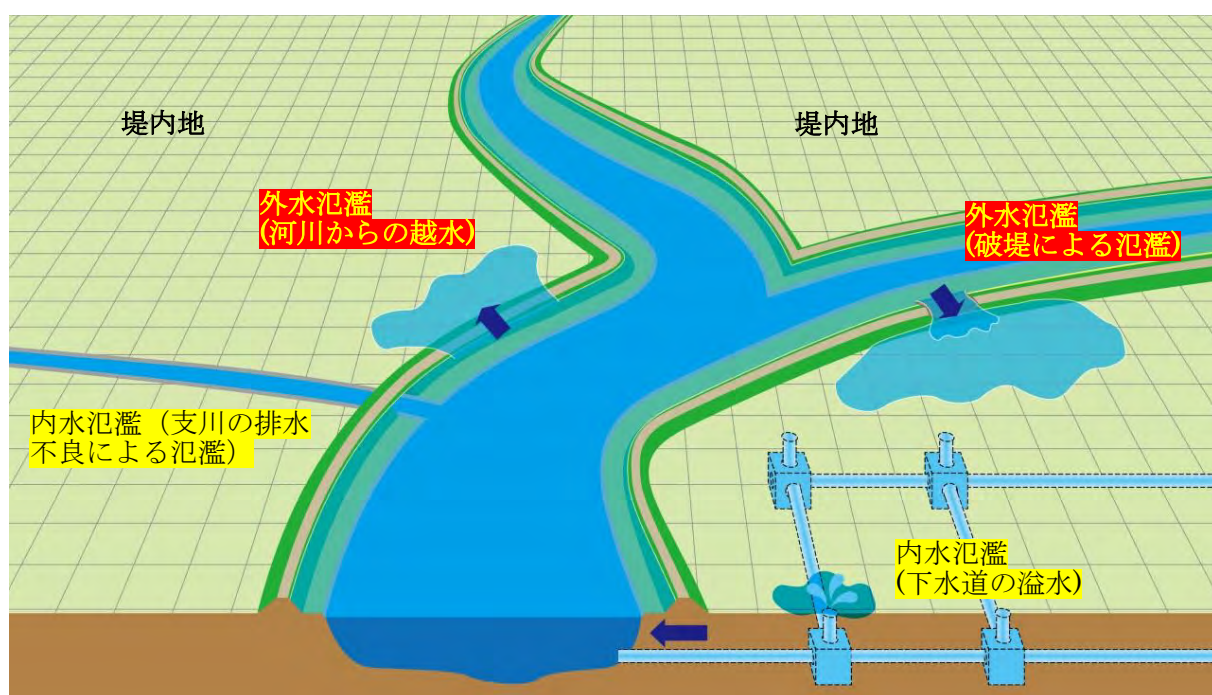


図 2.1.1 内水氾濫と外水氾濫の概念図

【氾濫に関する用語について】

- ・ 溢水：堤防内河川や下水道から水が溢れ出る現象
- ・ 越水：河川の水が堤防を越えて溢れ出る現象
- ・ 破堤：堤防が河川水位の上昇等により決壊する現象
- ・ 外水氾濫：河川から堤内地へ氾濫する現象
- ・ 内水氾濫(広義)：降雨が排水量を超過し堤内地の排水河川や下水道から氾濫する現象
- ・ 内水氾濫(本研究)：下水道水位が上昇し地表面に水が溢れ出る現象

参考文献：防災科学技術研究所ライブラリー

2.1.1 外水解析の既往研究等の整理

対象洪水による各氾濫想定地点に対応する最大浸水区域を包含できるように、対象氾濫原を設定する。対象氾濫原の設定にあたっては、人工構造物や地形条件などを考慮して「流下型氾濫」「貯留型氾濫」「拡散型氾濫」の3タイプの類型化の可能性を判断するとともに、氾濫流が明らかに分離できるものを一連のブロックとして区分する。検討対象氾濫区域の設定や氾濫形態の類型化等により、氾濫区域が複数のブロックに分かれる場合は、各々のブロック毎に解析を行う。なお、ブロック分割を行うにあたり、氾濫解析における検討対象流量を設定し易いよう支川合流等により流量が変化する位置でブロックを分けることが望ましい（以上、「中小河川浸水想定区域図作成の手引き」より抜粋）。

- ・流下型氾濫：氾濫水が河川に沿って流下する氾濫であり、氾濫水位が河川の縦断方向に水面勾配を持つのが特徴。
- ・貯留型氾濫：氾濫水が閉鎖型水域に貯留される氾濫であり、その水域内での氾濫水位はほぼ同一となる。ただし、地形的に貯留型であっても河川の縦断方向に水面勾配を持つ場合は、流下型として評価する。
- ・拡散型氾濫：氾濫水が地形に応じて拡散する氾濫

表 2.1.1 都市部にける氾濫解析に関する既往研究

著者	研究内容
岩佐ら(1980)	・堤内地を対象とした平面二次元氾濫解析手法を提案した。
佐藤・首藤ら(1989)	・堤内地の家屋、道路、植生を運動方程式に抵抗係数として考慮した手法を提案した。
末次・栗城ら(1998)	・堤内地の氾濫解析において、氾濫実験結果から運動方程式の拡散項を考慮しなくて良いことを明らかにした。
福岡ら(1998)	・市街地の氾濫解析において、家屋前後の水深から家屋から受ける抵抗力を運動方程式中で考慮した手法を提案した。
川池・戸田ら(2002)	・直交座標系、一般曲線座標系、非構造格子、道路ネットワークの4手法で氾濫解析を実施し、道路・建物のモデル化状況に応じて氾濫流の到達時間が異なることを明らかにした。
三浦・川村ら(2011)	・札幌市街部の氾濫模型実験結果を参考に家屋による影響を建物占有率として連続的に考慮する手法を提案した。

2.2 札幌圏域を対象とした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河川流出と③下水道雨水流出から算定した。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拡がり解析した。

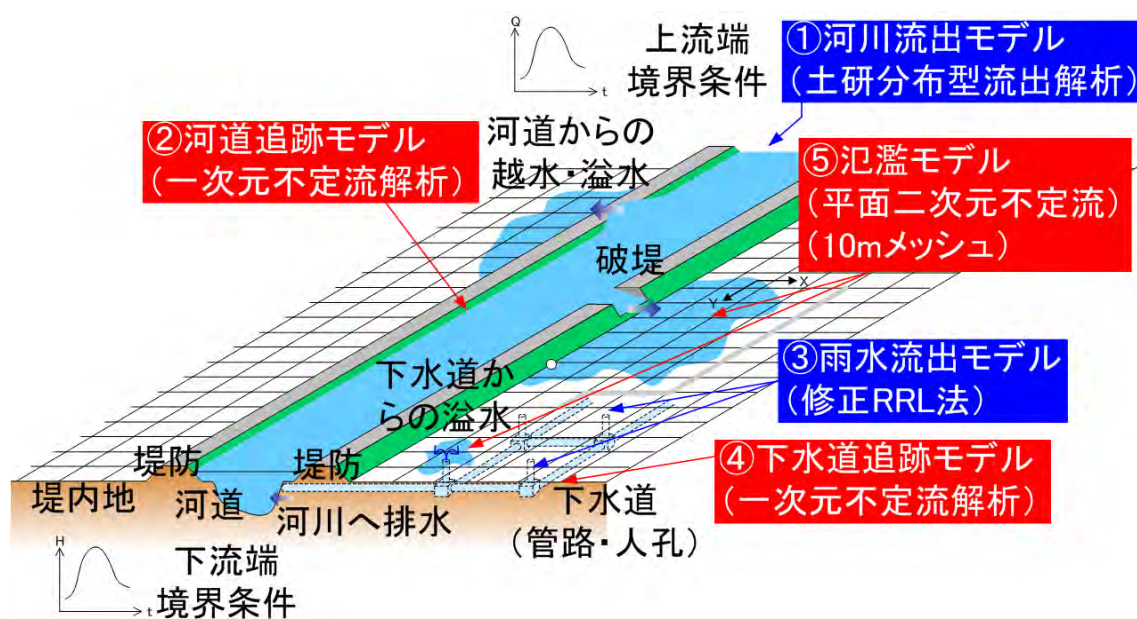


図 2.2.1 氾濫解析モデル概要図

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。これは、後述の札幌市街地で著者が確認した窪地への湛水による浸水被害を評価できないという課題を有する。そのため、下水道に流入せず、地形的に窪地になっている箇所に集まることで発生する浸水被害を再現するため、図 2.2.2 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」に分離して汎濫計算モデルに与えることで地表湛水を再現した。降雨量の分離は、下水道集水区内の人孔(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。

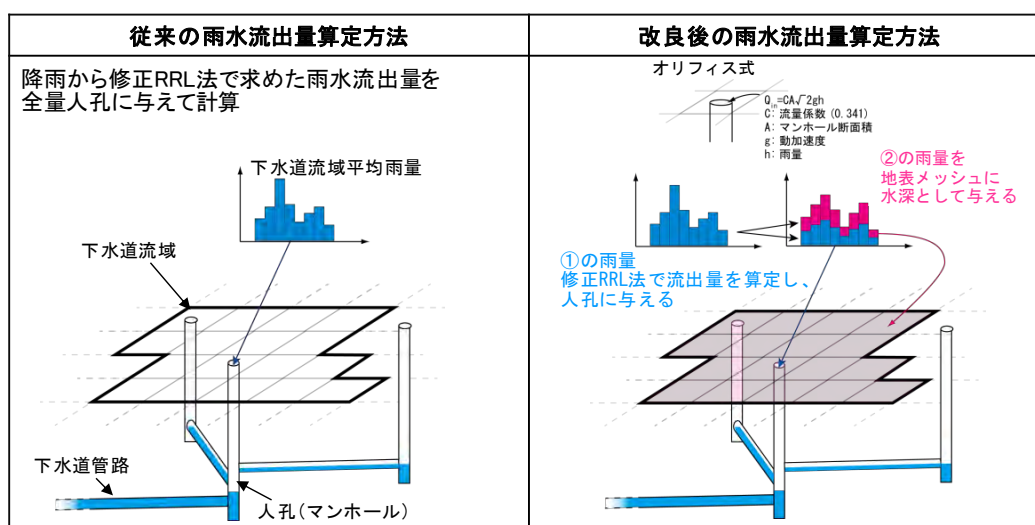


図 2.2.2 下水道への雨水流出量の算定方法

2.2.1 氾濫解析モデルの概要

浸水解析モデルは、氾濫原を流下する氾濫流の挙動を平面二次元不定流計算により把握する。

このモデルは、河道の水位・流量の縦断的・時間的变化と、堤内地の氾濫流の挙動を同時に追跡するものであり、河道と堤内地との間で、氾濫流量の相互のやりとりを行うものである。これにより、溢水による河道下流区間での流量低減や、洪水が流下した後の河道への戻り流を考慮した氾濫解析を行うことが可能となる。

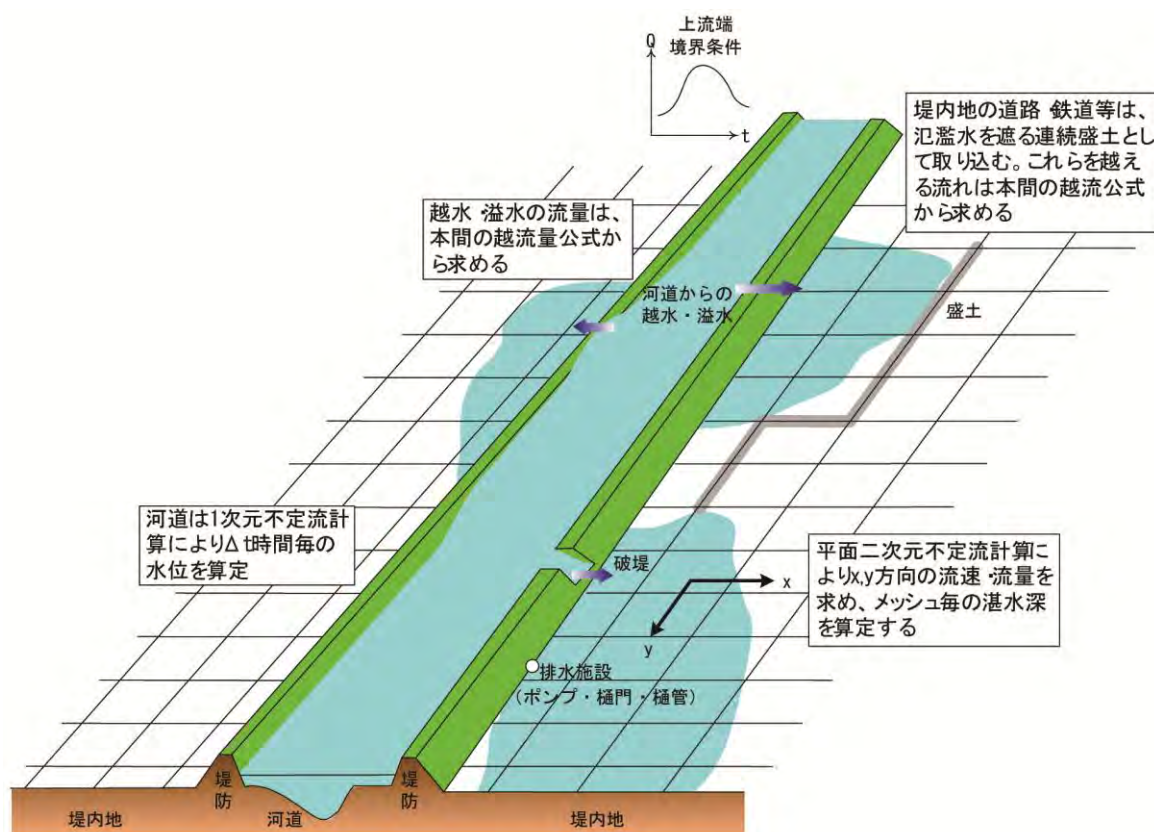


図 2.2.3 氾濫解析モデルの概念図（河道と氾濫原を一体的に解析）

- 1) 河道の不定流計算により計算時間刻みごとに河道の水位(H)を算出する。
- 2) 堤内地盤高をもとに河道水位と堤内地水位の関係から越流式（本間の越流公式）により越流量を計算する。
- 3) その越流量を境界条件として二次元不定流計算によりメッシュごとの流速・水深を求める。
- 4) 越流後は、計算終了時刻に至るまで 1)～3)を繰り返す。

(1) 浸水解析の概略手順

浸水解析の概略手順は図 2.2.4 のとおりである。

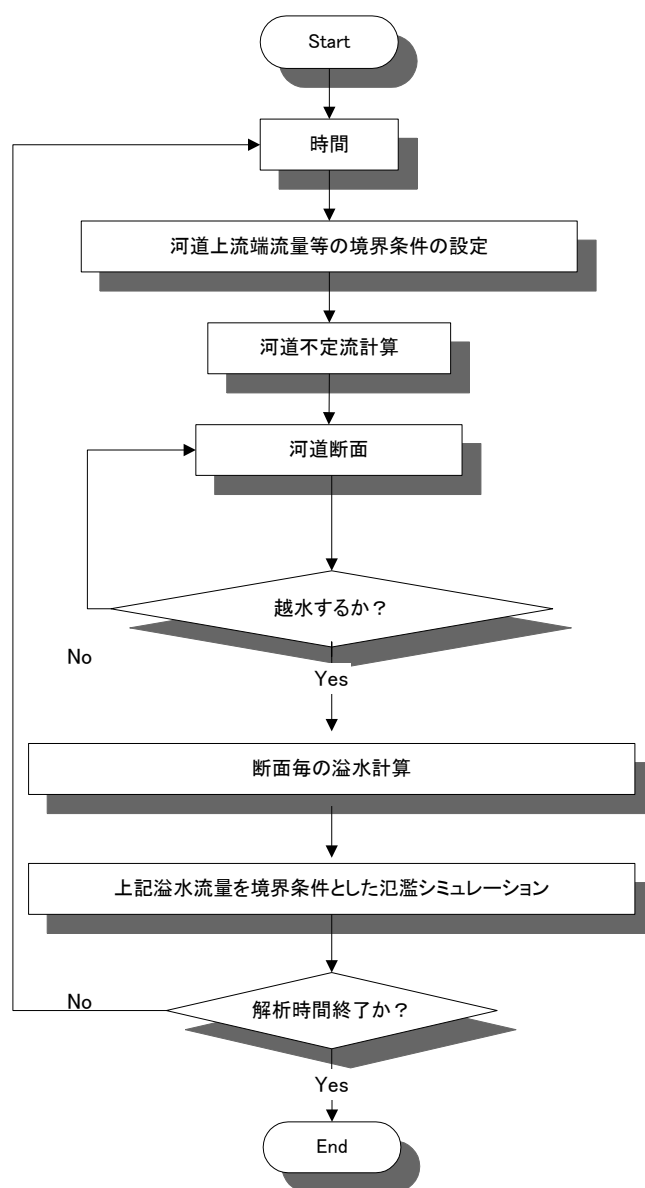


図 2.2.4 浸水解析の概略手順

2.2.2 浸水解析モデルの基礎式

河道一次元不定流計算および平面二次元不定流計算に用いる基礎方程式を以下に示す。

(1) 河道一次元不定流計算モデルの基礎方程式

河道の一次元不定流計算の解法は、開水路流れの数値解析のとおりとする。ここで、開水路流れの数値解析は以下のとおり要約される。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \cdots \cdots (2.2-1)$$

$$\frac{\beta}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \lambda \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{dv}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = s_o - s_f \quad \cdots \cdots (2.2-2)$$

ここに、 v : 断面平均流速、 h : 水深、 g : 重力加速度、 s_o : 水路勾配、
 s_f : 摩擦勾配 $= s_f = n^2 v^2 / R^{4/3}$ 、 α 、 β : 流速分布形による補正係数、
 λ : 圧力補正係数、である。

(2.2-2)式は次の全エネルギー水頭 $H_t = z + \lambda h \cos \theta + \frac{av^2}{2g} = H + \frac{av^2}{2g}$ を導入すれば、

$$\frac{\beta}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial H_t}{\partial x} = -s_f \quad \cdots \cdots (2.2-3)$$

ここに、 z : 基準面から河床までの高さ、 $H = z + \lambda h \cos \theta$: 水位、である。

(2.2-1)～(2.2-3)式によって構成される系は双曲型であるから、次のように特性曲線による表示に改められる。

$$\text{特性曲線 : } \left(\frac{dx}{dt} \right)_{\pm} = \frac{a+\beta}{2\beta} v \pm c \cong v \pm c \quad \cdots \cdots (2.2-4)$$

に沿って、

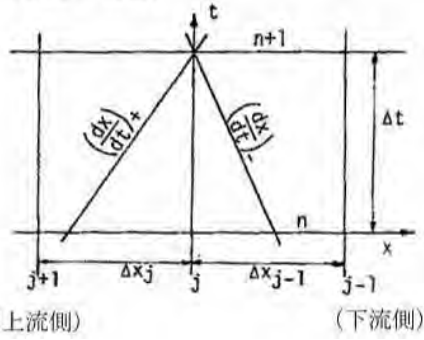
$$\left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) + \left(\frac{a-\beta}{2\beta} v \pm c \right) \left(\frac{\beta}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial H_t}{\partial x} + s_f \right) = 0 \quad \cdots \cdots (2.2-5)$$

が成立する。ここに複合は同順にとられ、また c は、

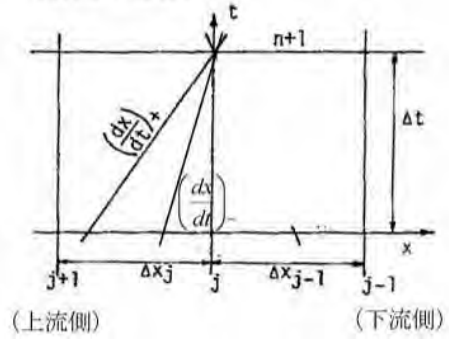
$$c = \sqrt{\left(\frac{a-\beta}{2\beta} v \right)^2 + \frac{\lambda g \cos \theta \cdot A}{\beta B}} \cong \sqrt{gA/B} \quad (2.2-6)$$

で定義され、平均流速に相対的にとられた dynamic wave の伝播速度である。流れを常流 ($c > v$) とすれば、式(2.2-4)で示される 2 つの dynamic wave の伝播方向は互いに異符号であって、正のものは上流から下流に流下する dynamic wave を、負のものは下流から上流へ遡上する dynamic wave を表す。また、式(2.2-5)はそれぞれの dynamic wave によって上・下流へ伝えられる影響を表している。

(常流の場合)



(射流の場合)



流れが常流であれば,

(j+1)~(j)間では, 正の特性曲線として,

$$\left(\frac{\lambda \cos \theta}{B}\right)_j^n \left(\frac{A_j^{n+1} - A_j^n}{\Delta t} + \frac{Q_j^n - Q_{j+1}^n}{\Delta t_j} - q_j^n\right) + \left(\frac{a-\beta}{2\beta} - v + c\right)_j^n \left(\frac{\beta v_j^{n+1} - v_j^n}{g \Delta t} + \frac{H_{1j}^n - H_{1j+1}^n}{\Delta t_j} + \frac{s_{fj+1}^n + s_{fj}^{n+1}}{2}\right) = 0 \quad \dots\dots\dots(2.2-7)$$

(j)~(j-1)間では, 負の特性曲線として,

$$\left(\frac{\lambda \cos \theta}{B}\right)_j^n \left(\frac{A_j^{n+1} - A_j^n}{\Delta t} + \frac{Q_{j-1}^n - Q_j^n}{\Delta t_{j-1}} - q_{j-1}^n\right) + \left(\frac{a-\beta}{2\beta} - v - c\right)_j^n \left(\frac{\beta v_j^{n+1} - v_j^n}{g \Delta t} + \frac{H_{1j-1}^n - H_{1j}^n}{\Delta x_{j-1}} + \frac{s_{fj}^{n+1} + s_{fj-1}^n}{2}\right) = 0 \quad \dots\dots\dots(2.2-8)$$

と表される.

(2) 平面二次元不定流計算モデルの基礎方程式

氾濫流が市街地を通過する場合は、地形の影響だけでなく建物等により氾濫を阻止され、道路等空間に集中することが分かっている。

一方、従前の浸水解析においては地形データの密度や計算機の性能の制約から、250m程度のメッシュ幅を標準としており、建物や道路等はメッシュの粗度として表現され、浸水や流速もメッシュ平均として表現されていた。

しかし、DEMの整備や計算機の高速化により10mの細密なメッシュ計算では、建物をメッシュの粗度だけでなく透過率・空隙率として表現することにより、浸水現象をより忠実に表現できると考えられる。

以下に、浸水域内に建物が存在する場合の、平面二次元不定流のメッシュによる数値解法を用いた基礎式を以下にとりまとめた。

1) 基礎方程式

構造物が流れに及ぼす効果には、幾何学的効果と物理的效果があるため、榊山・鹿島を参考にして式(2.2-9)～(2.2-12)のとおり表現し、鉛直方向に積分することにより、基礎方程式を導いている。ただし、連続な物体中を想定し透過率を全て空隙率に書き換えた。氾濫流については一般に浅水流れの条件が成り立つため、 z 方向の運動方程式は静水圧の式(2.2-12)となる。

●運動方程式 (x 方向)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \gamma \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial z} + R_x = 0 \quad \cdots(2.2-9)$$

●運動方程式 (y 方向)

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \gamma \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \tau_y}{\partial z} + R_y = 0 \quad \cdots(2.2-10)$$

●連続式

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \cdots(2.2-11)$$

●静水圧の式 (z 方向の運動方程式)

$$p = g(h + z_b - z), \quad z_b \leq z \leq h + z_b \quad \cdots(2.2-12)$$

ここに、

P : 圧力, ρ : 水の密度, h : 水深, u : x 方向流速, v : y 方向流速, w : z 方向流速,
 g : 重力加速度, z_b : 地盤高, γ : 空隙率の密度分布 (ただし、鉛直方向に一定)
 τ_x, τ_y : セン断力, R_x, R_y : 抗力項

式(2.2-9)～(2.2-11)を鉛直方向に積分して水深平均化した基礎方程式は式(2.2-13)～(2.2-15)のとおりとなる。連続式については、降雨や地下浸透量をここで加味し、建物内に浸水が生じ瞬時に建物内外の水位が等しくなると仮定することで水深の時間変化については空隙率を考慮しない。

●運動方程式 (x 方向)

$$\gamma \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{Q_x^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{Q_x Q_y}{h} \right) + g \gamma h \frac{\partial (h + z_b)}{\partial x} - \tau_{sx} + \tau_{bx} + hR_x = 0 \quad \dots\dots\dots(2.2-13)$$

●運動方程式 (y 方向)

$$\gamma \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{Q_x Q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{Q_y^2}{h} \right) + g \gamma h \frac{\partial (h + z_b)}{\partial y} - \tau_{sy} + \tau_{by} + hR_y = 0 \quad \dots\dots\dots(2.2-14)$$

●連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (\gamma Q_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma Q_y)}{\partial y} = q \quad \dots\dots\dots(2.2-15)$$

ここに、

Q_x, Q_y : x, y 方向の単位幅流量, ρ : 水の密度, h : 水深, g : 重力加速度,

Z_b : 地盤高, γ : 空隙率の密度分布 (ただし、鉛直方向に一定)

τ_{sx}, τ_{sy} : 水面に作用するせん断力, τ_{bx}, τ_{by} : 底面摩擦力

抗力項は式(2.2-16)、底面摩擦はマニング式より式(2.2-17)で表される。

水面に作用するせん断力 τ_{sx}, τ_{sy} は底面摩擦と比較して微小であるため無視している。

●抗力項

$$hR_x = \frac{1}{2} C_D (1 - \gamma) \frac{Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h}, \quad hR_y = \frac{1}{2} C_D (1 - \gamma) \frac{Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h} \quad \dots\dots\dots(2.2-16)$$

●底面摩擦

$$\tau_{bx} = g \gamma n^2 \frac{Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h^{7/3}}, \quad \tau_{by} = g \gamma n^2 \frac{Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h^{7/3}} \quad \dots\dots\dots(2.2-17)$$

2) 基礎方程式の差分化

差分化の過程において、基礎方程式中の γ （空隙率の密度分布）が以下の3種の変数に分類されている。ここでは空隙率の密度を差分化する際の概念を整理した。

γ_v : メッシュの平均空隙率

γ_x : x 方向の透過率（メッシュ境界における平均空隙率）

γ_y : y 方向の透過率（メッシュ境界における平均空隙率）

●運動方程式（x 方向）

$$\begin{aligned}
 & \boxed{\gamma_v}_{i+1/2,j} \frac{Q_{x,i+1/2,j}^{t+\Delta t} - Q_{x,i+1/2,j}^t}{\Delta t} \\
 & + \frac{1}{\Delta x} \left(\boxed{\gamma_x}_{i+1,j} \frac{Q_x^2}{h} - \boxed{\gamma_x}_{i,j} \frac{Q_x^2}{h} \right)^{t+\theta\Delta t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\boxed{\gamma_y}_{i+1/2,j+1/2} \frac{Q_x Q_y}{h} - \boxed{\gamma_y}_{i+1/2,j-1/2} \frac{Q_x Q_y}{h} \right)^{t+\theta\Delta t} \\
 & + \boxed{g\gamma_v}_{i+1/2,j} h_{i+1/2,j}^{t+\theta\Delta t} \frac{\{(h+z_b)_{i+1,j} - (h+z_b)_{i,j}\}^{t+\theta\Delta t}}{\Delta x} \\
 & + (\boxed{g\gamma_v} n_b^2 \frac{Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h^{7/3}} + \frac{1}{2} (1 - \gamma_v) C_D \frac{Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h})_{i+1/2,j}^{t+\theta\Delta t} = 0
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

●運動方程式（y 方向）

$$\begin{aligned}
 & \boxed{\gamma_v}_{i,j+1/2} \frac{Q_{y,i,j+1/2}^{t+\Delta t} - Q_{y,i,j+1/2}^t}{\Delta t} \\
 & + \frac{1}{\Delta x} \left(\boxed{\gamma_x}_{i+1/2,j+1/2} \frac{Q_x Q_y}{h} - \boxed{\gamma_x}_{i-1/2,j+1/2} \frac{Q_x Q_y}{h} \right)^{t+\theta\Delta t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\boxed{\gamma_y}_{i,j+1} \frac{Q_y^2}{h} - \boxed{\gamma_y}_{i,j} \frac{Q_y^2}{h} \right)^{t+\theta\Delta t} \\
 & + \boxed{g\gamma_v}_{i,j+1/2} h_{i,j+1/2}^{t+\theta\Delta t} \frac{\{(h+z_b)_{i,j+1} - (h+z_b)_{i,j}\}^{t+\theta\Delta t}}{\Delta y} \\
 & + (\boxed{g\gamma_v} n_b^2 \frac{Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h^{7/3}} + \frac{1}{2} (1 - \gamma_v) C_D \frac{Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h})_{i,j+1/2}^{t+\theta\Delta t} = 0
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

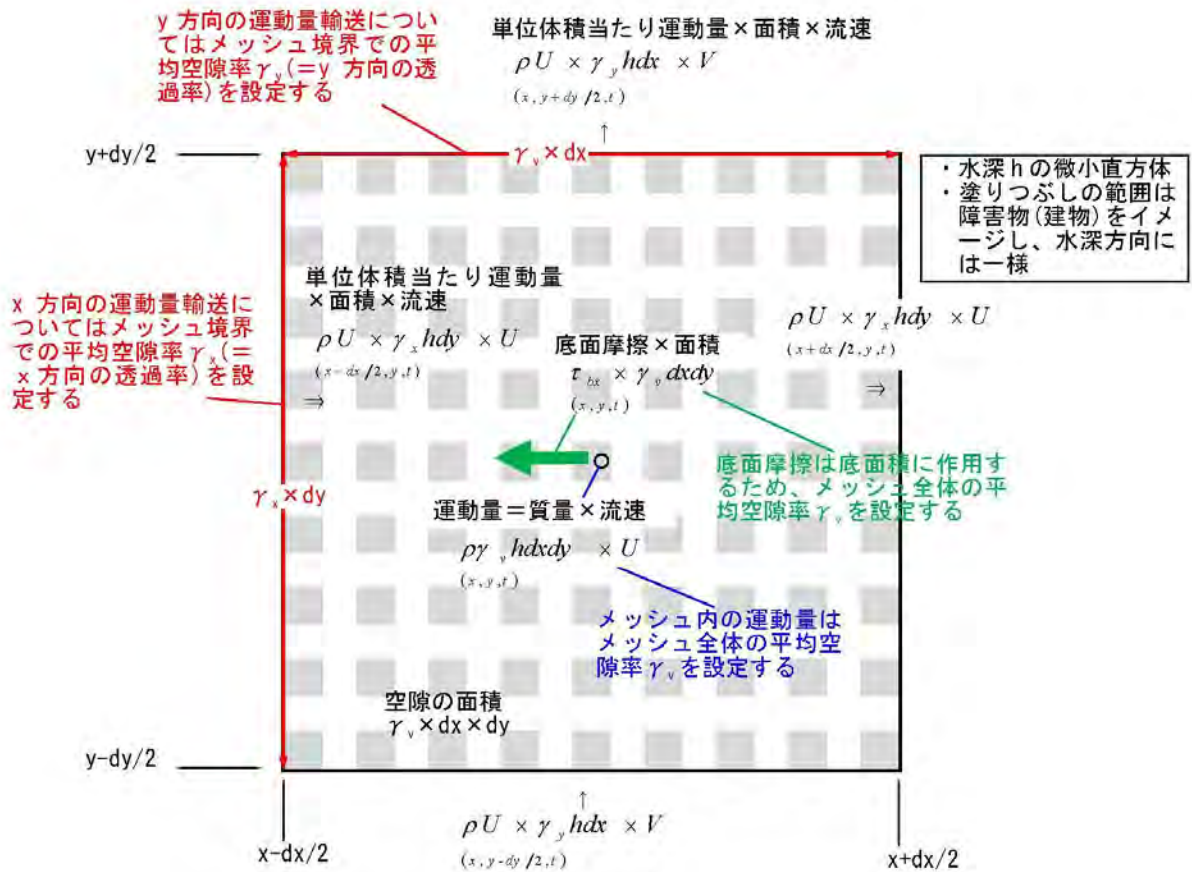
●連続式

$$\begin{aligned}
 & \frac{h_{i,j}^{t+\Delta t} - h_{i,j}^t}{\Delta t} \\
 & + \frac{\{\boxed{\gamma_x}_{i+1/2,j} Q_x - \boxed{\gamma_x}_{i-1/2,j} Q_x\}^{t+\theta\Delta t}}{\Delta x} + \frac{\{\boxed{\gamma_y}_{i,j+1/2} Q_y - \boxed{\gamma_y}_{i,j-1/2} Q_y\}^{t+\theta\Delta t}}{\Delta y} = q_{i,j}^{t+\theta\Delta t}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$\boxed{}$: メッシュ内の体積に乘じる係数(γ_v)

$\boxed{}$: メッシュの底面積に乘じる係数(γ_v)

$\boxed{}$: メッシュの境界に乘じる係数(γ_x, γ_y)



● 圧力 (x 方向)

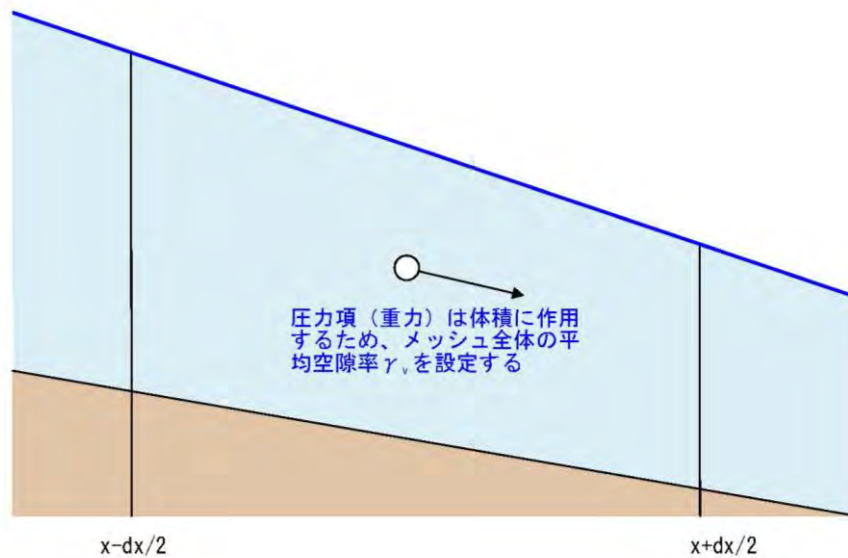


図 2.2.5 空隙率・透過率の概念

(3) 空隙率・透過率の設定

空隙率については、メッシュ内の建物占有面積率を算定することにより設定する。設定にあたっては「基盤地図情報 2500（国土地理院）」、「基盤地図情報 1/10 細分メッシュ（国土交通省）」、「数値地図 5000（土地利用）」等を利用した。なお、メッシュ全域が建物で占有される場合は当該メッシュを不透過境界で囲み計算領域から除くか、若しくは空隙率の最小値を 5～10%程度に設定する等により計算の安定性を確保する。透過率については、流量の計算格子点が設定されるメッシュ境界上の建物占有延長から、別途示す式のとおり設定することを基本とする。

以下の式より、各メッシュの空隙率・透過率を設定する。

$$v_v = 1 - (S1 + S2) / (DX * DY) \dots\dots\dots(2.2-18)$$

$$v_x = 1 - B_y / DY, \quad v_y = 1 - B_x / DX \dots\dots\dots(2.2-19)$$

$$v_x = v_y = 1 - \sqrt{1 - v_v} \dots\dots\dots(2.2-20)$$

ここに、DX,DY：それぞれ x 軸方向, y 軸方向のメッシュスケール,

S1,S2：メッシュ内の建物敷地面積, Bx,By：メッシュ境界上の建物占有延長

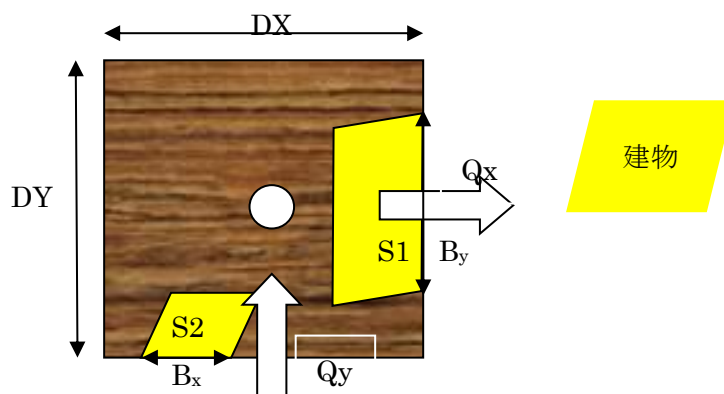


図 2.2.6 メッシュ内の建物と透過率・空隙率の設定

(4) 河川からの越流条件

越流条件は横越流公式を適用することを基本とし、流量及び越流の方向角を与えるものとする。越流公式による計算は、河道流量との収支を一切考慮していないため、場合によっては過大な越流量が計算されることがある。したがって、河道内の不定流計算に越流量を考慮する方法の他、越流公式により求めた越流量 Q_B が決壊敷高以上の流量 Q_D より小さいことを確認し、大きい場合には $Q_B=Q_D$ とする等の制御が必要である。また、堤内の水位が河道の水位より大きい場合には、堤内から河道へ逆流するものとし、この場合は正面越流公式（本間式）により与える。計算メッシュの細密化によりメッシュ幅が決壊幅より小さくなるため、図 2.2.7 に示すとおり、決壊部に対応するメッシュ毎に越流量と越流方向を求め、その x,y 方向成分をそれぞれ設定する。

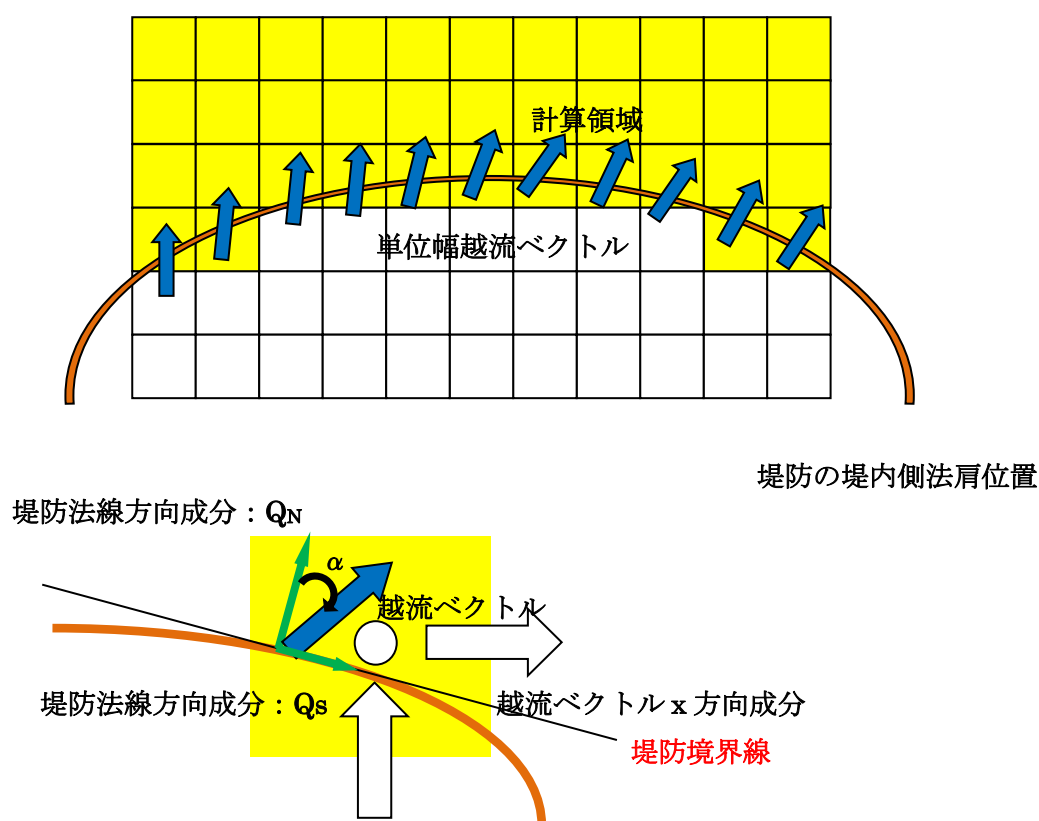


図 2.2.7 浸水解析における越流条件の設定

1) 横越流公式

横越流に関しては本来蛇行等の河道の平面形状の影響を受けるものと考えられるが、現状では直線河道においてのみ越流量の公式が提案されているに過ぎない。ただし、秋山ら(2008)より、蛇行部の横越流についても本間公式の流向補正により実験結果をある程度再現できていることから、下記の方法 1), 2)を参考として提示する。

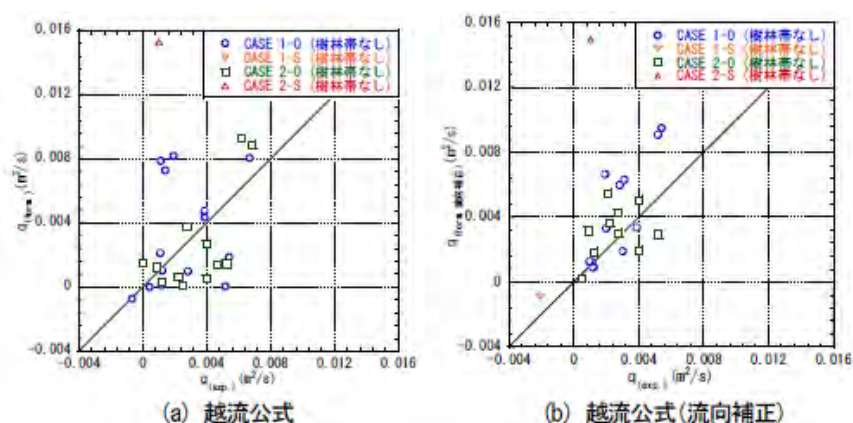


図 2.2.8 越流公式と実験結果の比較（蛇行区間）（秋山等(2008)より）

a) 栗城等の式

本間の正面越流式による単位幅流量： Q_0 を流出角度： θ と補正係数： α で修正することにより横越流量を定式化したものであり、河床勾配： I により流出角度，補正係数を表している。ここで， Q_N, Q_S ：単位幅当たりの越流量の堤防法線方向成分及び堤防接線方向成分である。

$$\text{堤防法線方向成分} \quad Q_N = \alpha Q_0 \cos \theta$$

$$\text{堤防接線方向成分} \quad Q_S = \alpha Q_0 \sin \theta$$

表 2.2.1 横越流特性（栗城等より）

決壊氾濫	溢水に伴う越流
$I > 1/1,580$ $\alpha = 0.14 + 0.19 \times \log_{10}(1/I)^\circ$, $\theta = 48 - 15 \log_{10}(1/I)^\circ$ $1/1,580 \geq I > 1/33,600$ $\alpha = 0.14 + 0.19 \times \log_{10}(1/I)^\circ$, $\theta = 0^\circ$ $1/33,600 \geq I$ $\alpha = 1$, $\theta = 0^\circ$	$I > 1/12,000$ $\alpha = 1$, $\theta = 1558 - 38 \times \log_{10}(1/I)^\circ$ $1/12,000 \geq I$ $\alpha = 1$, $\theta = 0^\circ$

b) 秋山等の式

直線河道における横越流の実験結果をもとに、本間の正面越流式を表-3.2.2 に示す流出角度： θ と補正係数 α で修正する形で、横越流量を定式化したものである。

$Fr = (Q_{IN}/B)/(gh^3)^{1/2}$ ：フルード数， Q_{IN} ：河道内流量， L ：決壊幅， B ：河道幅である。

表 2.2.2 横越流特性（秋山等より）

完全越流状態	もぐり越流状態
$\alpha_0 \cong 0.84 (\pm 0.03)$ (1) $\theta_0 \cong 53.0 (F_r)^{2.4} (L/B)^{1.3} + 7.5$ (2)	$\alpha_s \cong 0.66 (F_r)^{0.5} (L/B)^{0.1} + 0.3$ (3) $\theta_s \cong 99.0 (F_r)^{1.3} (L/B)^{1.1} + 12.0$ (4)

2) 正面越流公式（本間の公式）

河道と氾濫原との氾濫ボリュームのやり取りと、氾濫原内の連続盛土を越える越流量の算定には、本間の越流公式を採用する．なお、越流公式による計算は、河道流量との収支を一切考慮していないため、場合により過大な越流量が計算されることがある．

そのため、構築する氾濫シミュレーションモデルにおいては、越流公式により求めた越流量 Q_N が堤内地盤高以上の流量 Q_S より小さいことを確認し、大きい場合には $Q_N = Q_S$ とする等の制御を行う．また、堤内の水位が河道の水位より大きい場合には、堤内から河道へ逆流するとする．

完全越流 ($h_2/h_1 < 2/3$) の時 $Q_N = 0.35 \times h_1 \sqrt{2gh_1}$, $Q_S = 0$

潜り越流 ($h_2/h_1 \geq 2/3$) の時 $Q_N = 0.35 \times h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$, $Q_S = 0$

ただし、 h_1, h_2 は決壊敷高から測った水深で、高い方を h_1 、低い方を h_2 とする．なお堤内側の h_2 の設定位置については、越流現象とメッシュサイズから適切なメッシュ位置を定める必要がある．

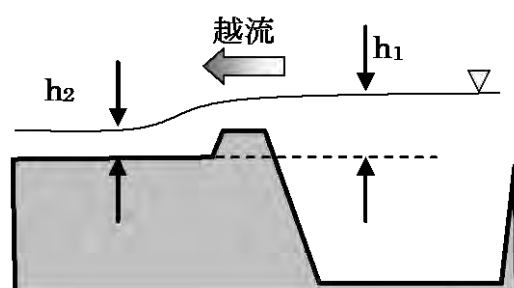


図 2.2.9 越流（破堤）模式図

また、氾濫流量 Q は氾濫の方向角度 θ により堤防法線方向成分と堤防接線方向成分に分けて氾濫原メッシュに与えるものとする．

堤防法線方向成分 $Q_N = \alpha Q_0 \cos \theta$

堤防接線方向成分 $Q_S = \alpha Q_0 \sin \theta$

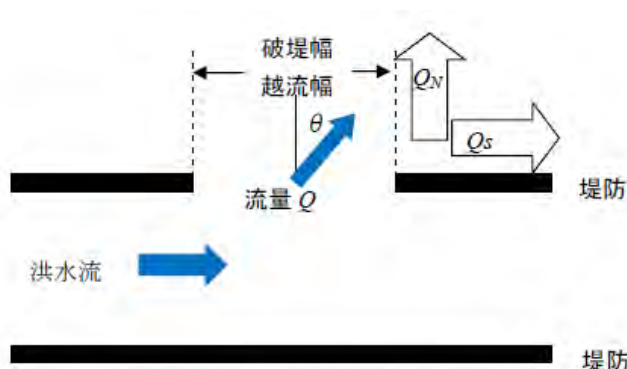


図 2.2.10 河川からの氾濫流量

（浸水想定区域図策定マニュアル改訂試行版 p15）

計算に当たっての氾濫形状等の条件設定については、当該河川における過去の決壊事例を参考とする他、「氾濫シミュレーション・マニュアル（案）」（建設省土木研究所、平成 8 年 2 月）を参考に以下によって設定する。

氾濫想定地点における堤防天端からの越水幅は、後述する決壊幅か、直下流決壊地点までの距離のいずれか小さい方とする。

決壊形状は実績値がある場合はそれを参考とするが、実績値がない場合は、決壊幅 y (m) は決壊個所が合流点付近か否かに分けて、川幅 x (m) より次式により算定する。

なお、合流点付近とは、合流の影響が無視できない規模の河川が合流している場合で、その目安は支川の川幅が本川の川幅の 3 割以上とし、影響区間は合流点から上下流に本川川幅の 2 倍程度の区間を目安とする。

(b) 合流点付近以外の場合: $y = 1.6 \times (\log_{10} x)^{3.8} + 62$

堤防は基部まで破堤するものとし、堤防位置における堤内地盤高と河道高水敷高のいずれか高い方を破堤敷高とする。

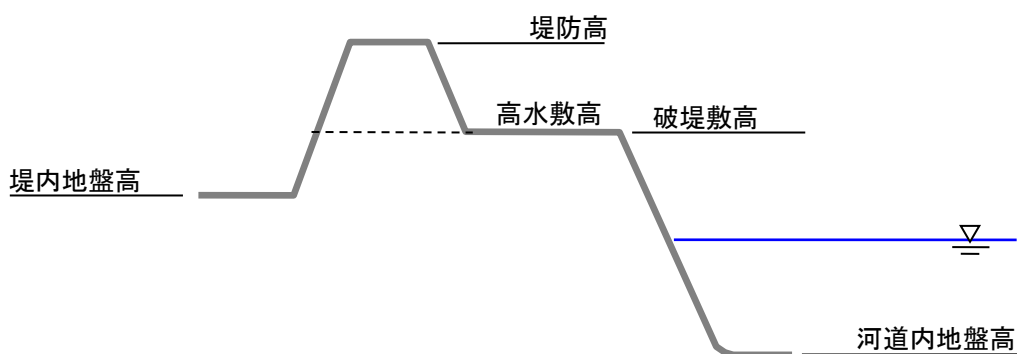


図 2.2.11 破堤敷高の設定

4) 決壊の進行時間

決壊後瞬時に最終決壊幅の2分の1 ($y/2$) が破堤し、その後1時間で最終決壊幅まで拡大するものとする。また、この間の決壊幅の拡大速度は一定とする。

なお、決壊敷高は瞬時に(3)の敷高となるものとする。

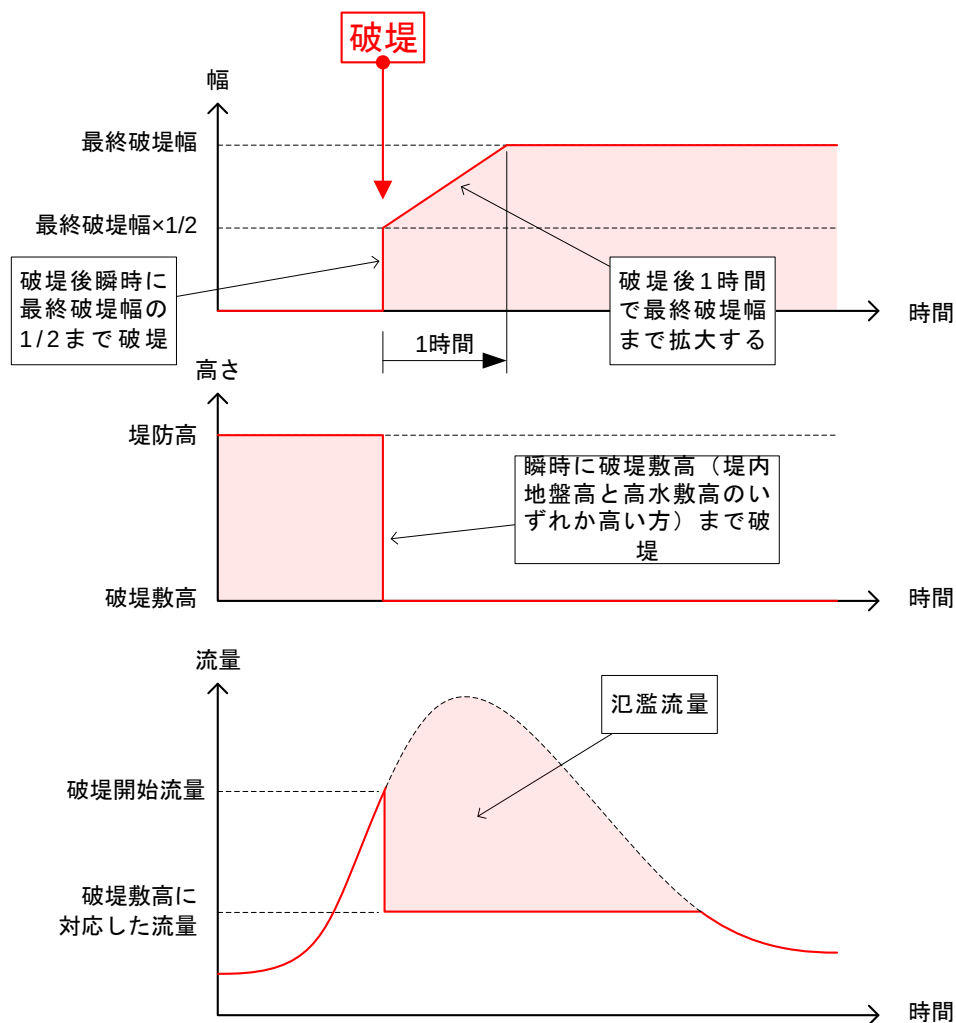


図 2.2.12 破堤幅進行時間の概念図

(6) 下水道解析モデルのアルゴリズム

以下に、本解析モデルの下水道のアルゴリズムを示す。

- ①下水道管路への流入流は、代表マンホールにまとめて流入を設定
- ②下水道からの氾濫発生は、マンホールの水位が地盤を超過すると発生
- ③代表マンホールから氾濫したボリュームは、設定したメッシュに等分配
思想は、主要幹線の水位が地表にしている場合は枝管で溢水している
- ④氾濫ボリュームを分配し、地表面で氾濫解析を実施する
- ⑤代表マンホールの水位が低下し、排水可能となると集水区内の平均値水深から越流量を算出し、流入ボリュームを設定したメッシュから差引くことで排水を再現

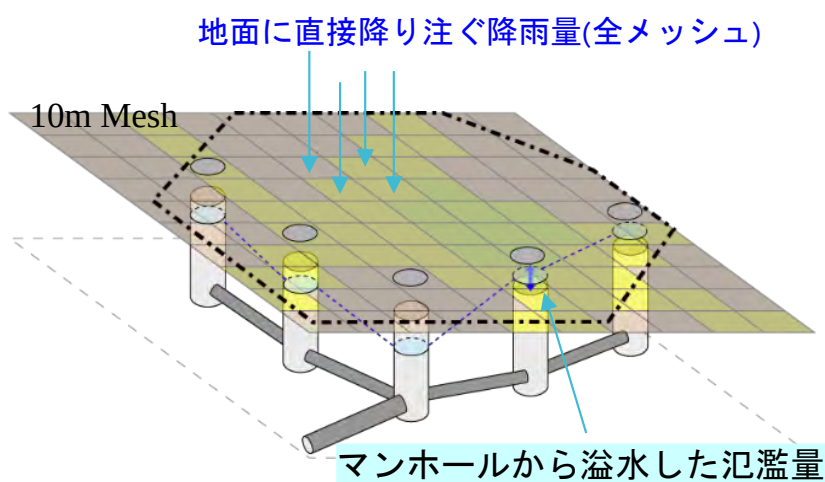


図 2.2.13 地表面氾濫モデルの概要

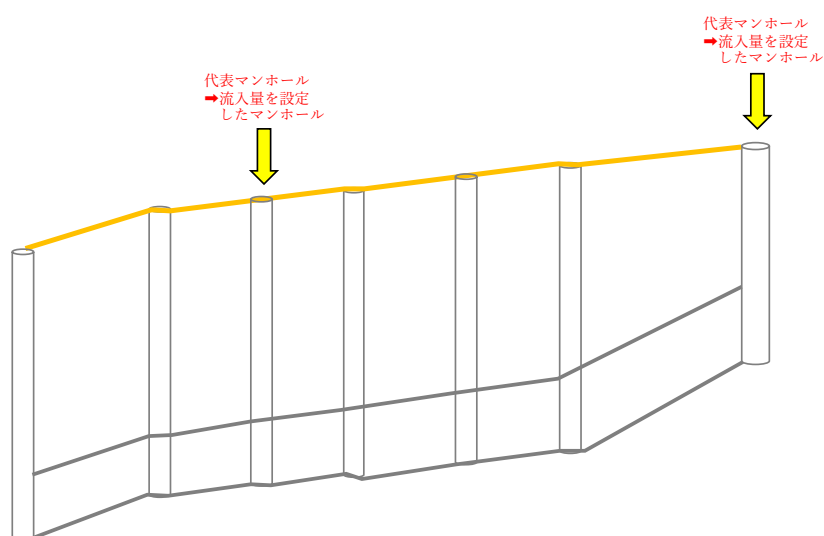


図 2.2.14 下水道解析モデルのアルゴリズム

2.2.3 モデル化対象管路

本検討では、下水道管路施設については管径 600mm 以上を基本としモデル化した。また、窪地等で発生する浸水被害の再現に必要な管渠等(管径 600mm 未満の管渠等)を適宜反映した。本検討では、図 2.2.15 に示す発注者から貸与された令和元年度までの整備が反映された下水道 GIS データを用いて管径 600mm 以上の管路を抽出しモデルした。

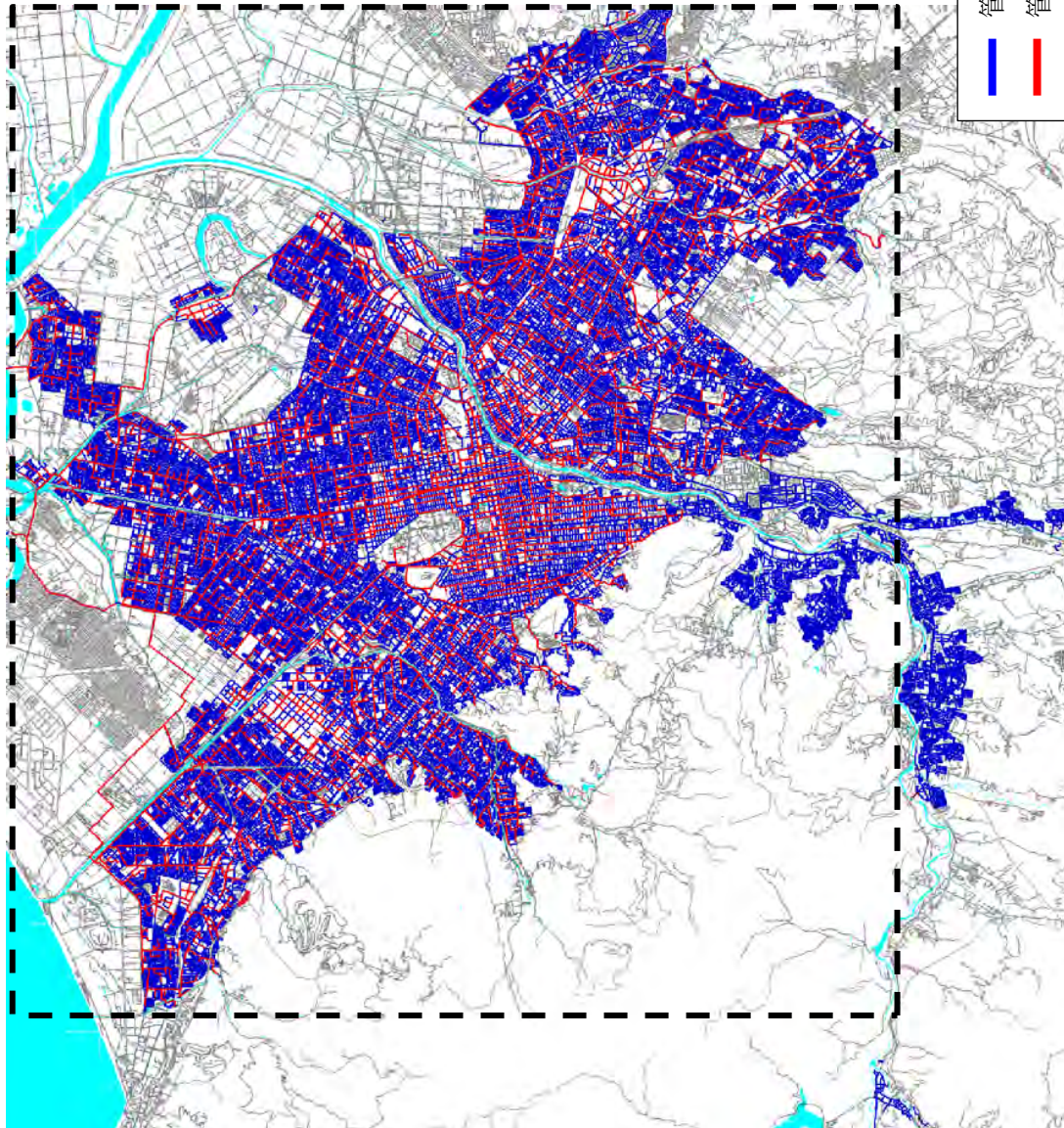


図 2.2.15 モデル化対象管路

2.2.4 下水道集水区の設定

管径 600mm 以上を基本としたランピングモデルを構築するため、各人孔に流入する集水区を設定した。ランピングモデルでは、管径 600mm 未満の管路をモデル化しないため、図 2.2.16 に示すようにモデル化対象外の管路の集水域では人孔から溢水せず浸水が発生しない(地表面の氾濫解析で氾濫流が流下してきた場合は浸水する)。本モデルは、管径 600mm 以上の管路のマンホールで溢水した場合に、該当管路に接続する管径 600mm 未満の管路の集水区も浸水が発生するように集水区を設定した。

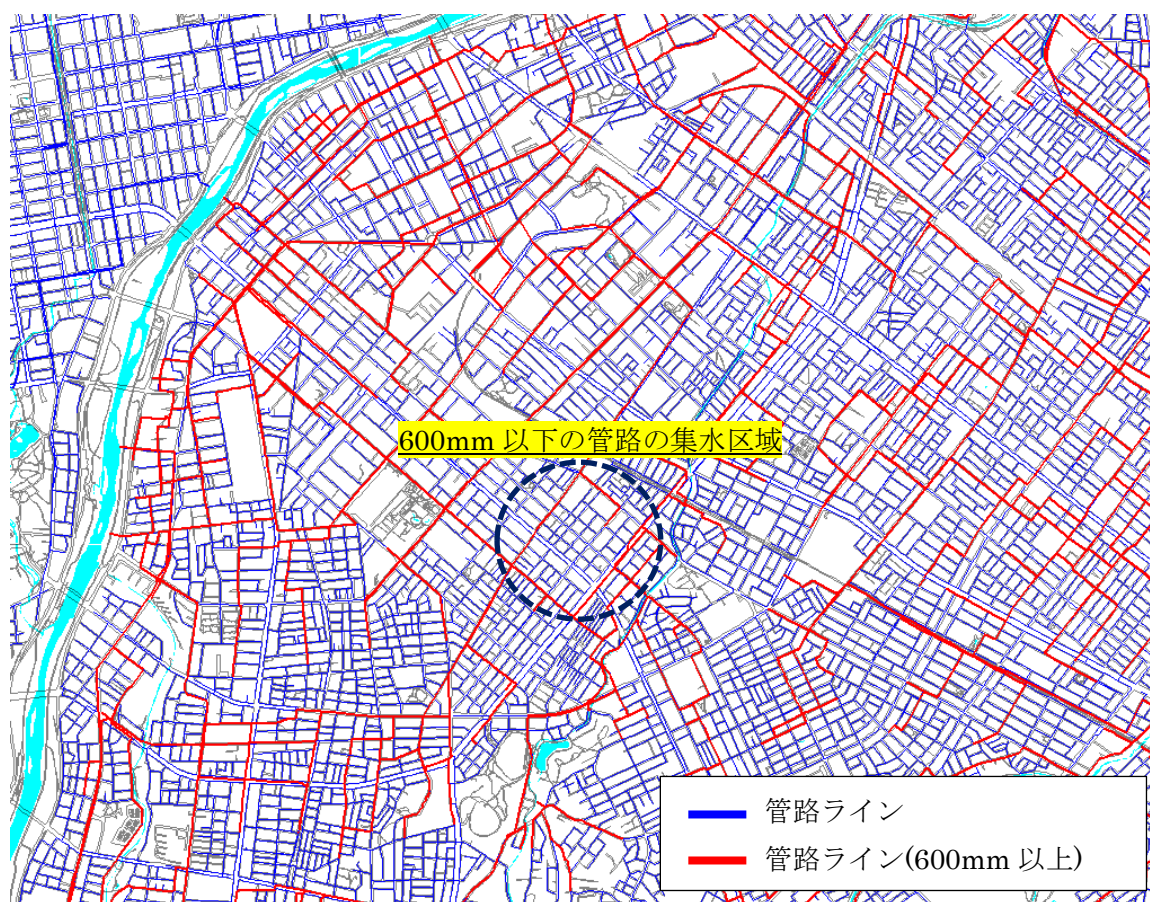


図 2.2.16 管路ラインのモデル化状況

集水区の設定は、全管路を対象とした「亀の甲図(図 2.2.17 参照)」を合成することで作成した。図 2.2.18 に 600mm 以上の管路を対象に、亀の甲を合成した例を示す。亀の甲の合成は、600mm 未満の管路の接続状況を参考に実施した。600mm 未満の管路をモデル化する場合、亀の甲をそのまま集水域として設定した。図 2.2.19 に本検討で設定した集水区を示す。モデル化する各人孔への流入量は、設定した集水区内の降雨量が流入することとした。

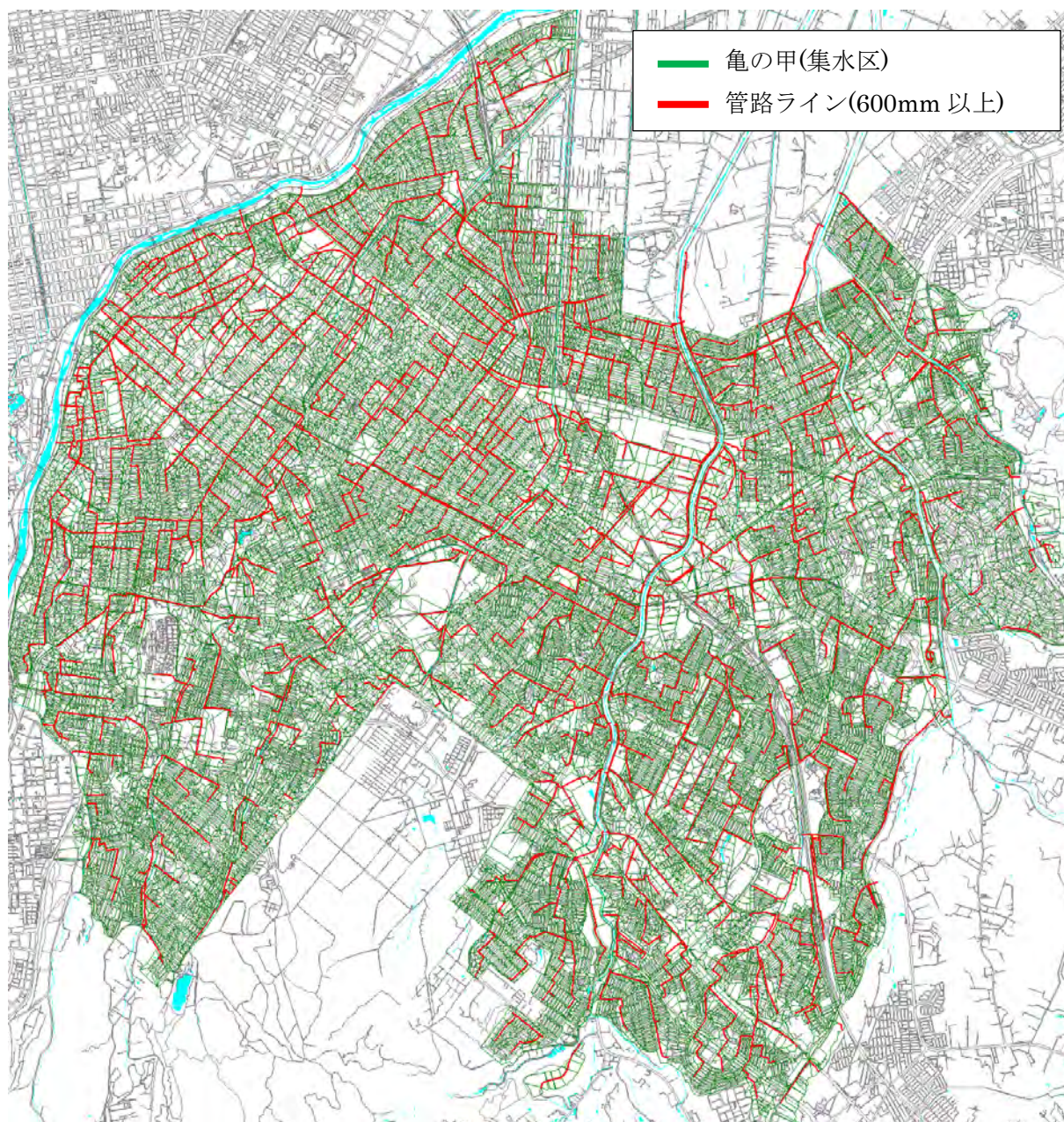


図 2.2.17 亀の甲図(豊平川右岸域)

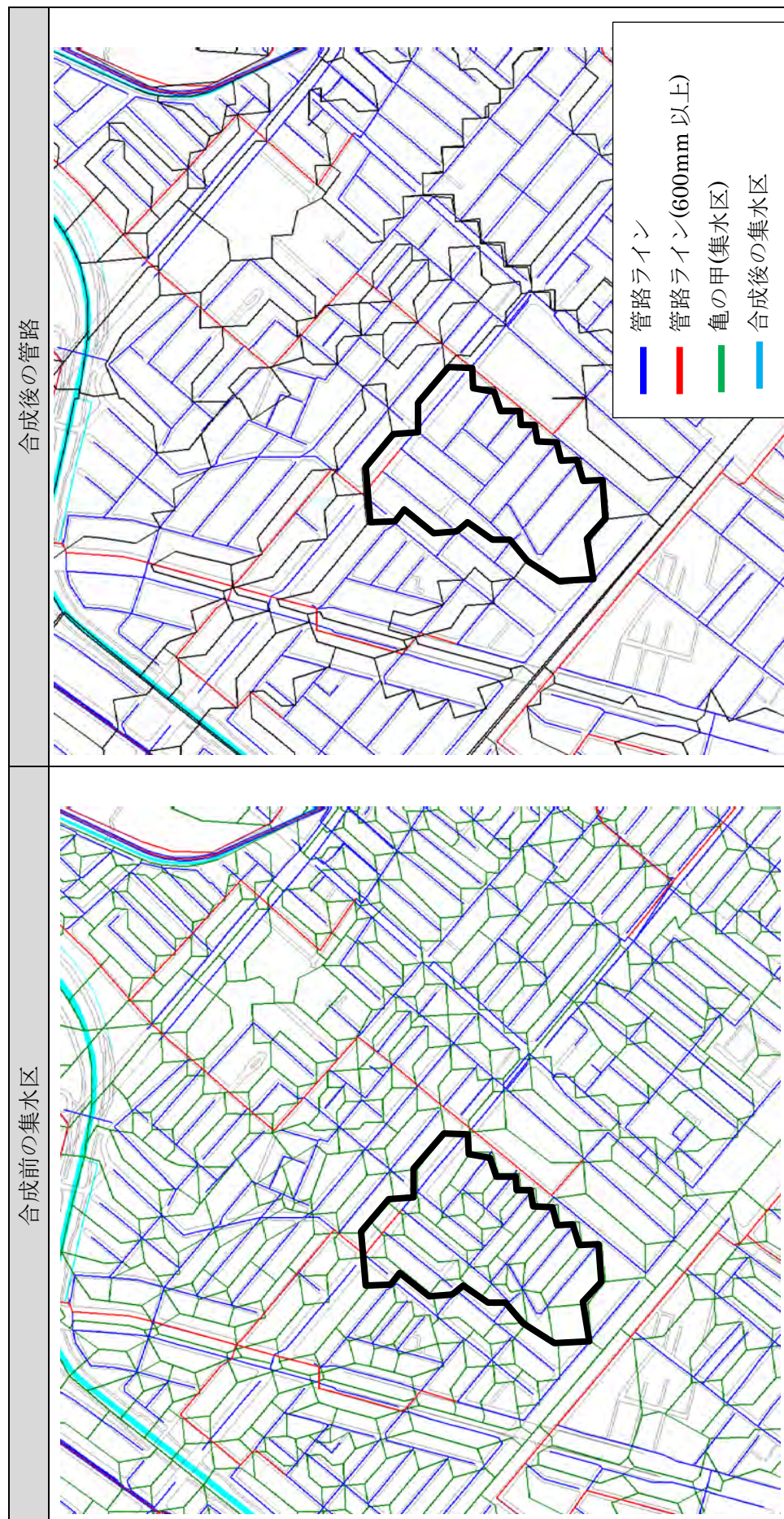


図 2.2.18 集水区(亀の甲)の合成

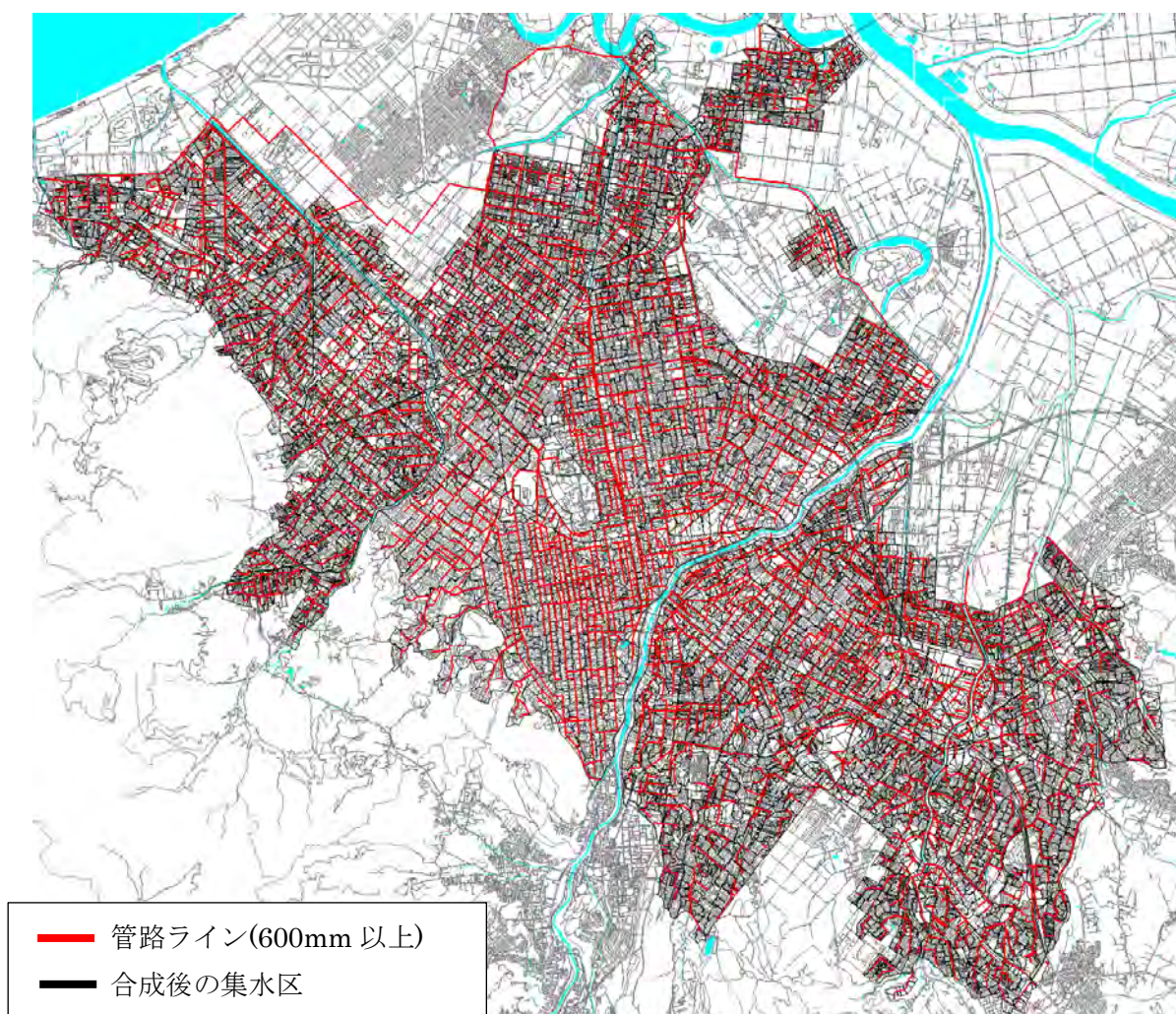


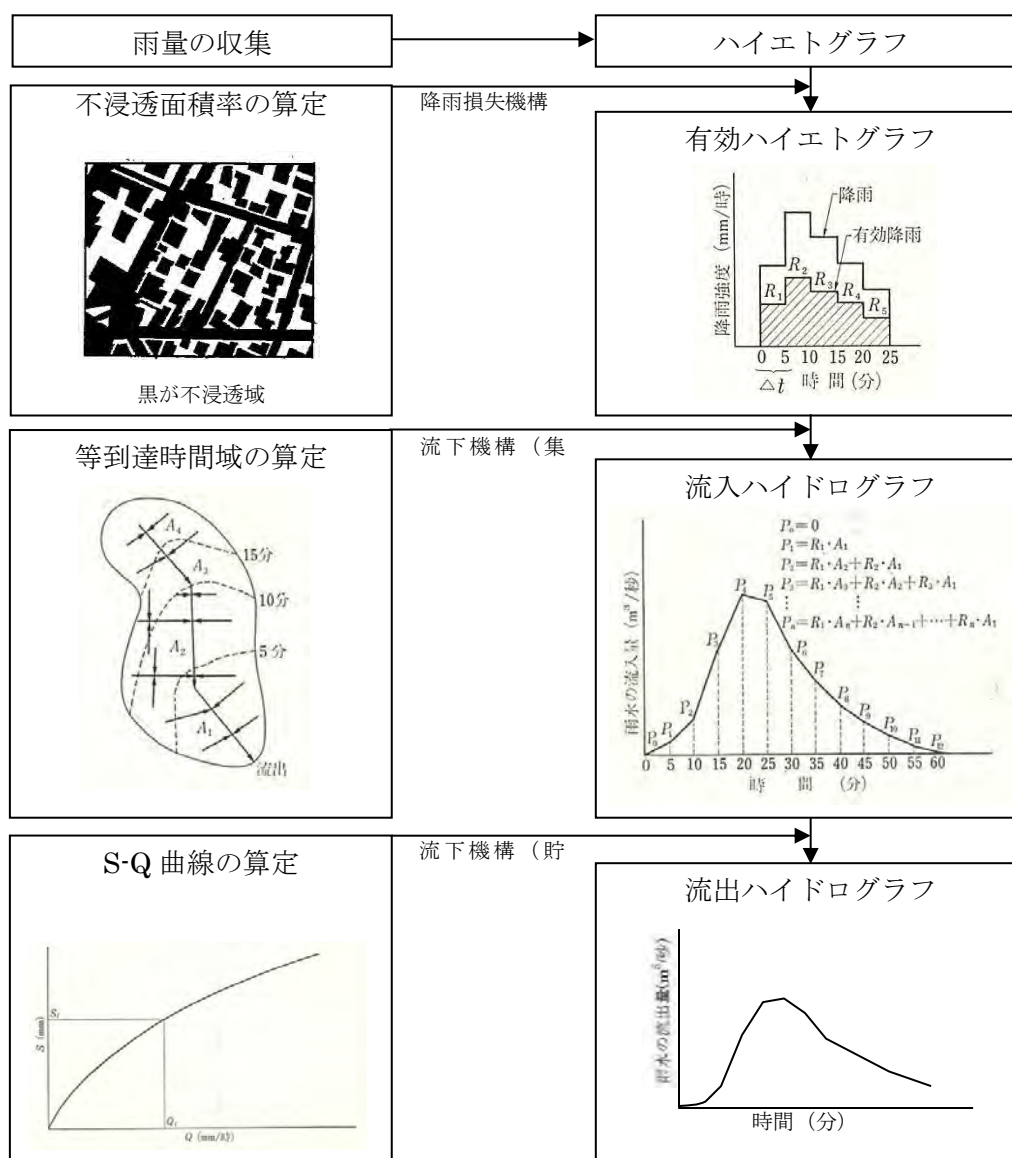
図 2.2.19 本検討で用いる 600mm 以上の管路を対象とした集水区

2.2.5 下水道雨量流出モデルの構築

本検討では、一般的な下水道計画値の流出係数等を参考に修正 RRL 法を用いて下水道流出モデルを構築した。

(1) 修正 RRL 法の概要

修正 RRL 法は、流出記録のない都市域（特に下水道整備域）において、降雨から懸案地点の流出ハイドログラフを算定する手段として、英国で開発された RRL 法(Road Research Laboratory Method)をもとに、旧建設省土木研究所が、有効降雨の算定と S-Q 曲線の推定法の部分を修正したものである。



注) 有効ハイエトグラフ、等到達時間の算定、流入ハイドログラフ、S-Q 曲線の算定に示した図は、「合流式下水道越流水対策と暫定指針 -1982 年版- 社団法人 日本下水道協会」より引用。

図 2.2.20 修正 RRL 法による流出計算フロー

(2) 有効降雨の考え方

RRL 法では、不浸透域に降った雨のみを有効降雨としているが、日本のように降雨強度の大きな雨を設計対象にする場合には、浸透域からの流出も考慮しなければならない。このため、修正 RRL 法では、浸透域に降った雨も一部有効雨量としている。修正 RRL 法における有効雨量算定の一般的な考え方を図 2.2.21 に示す。図 2.2.21 より、修正 RRL 法では、降雨の損失とし凹地貯留損失、浸透損失を考慮する。凹地貯留損失は、一般的な損失として 6mm を考慮した。浸透損失は、一般的な値である 10mm を設定した。

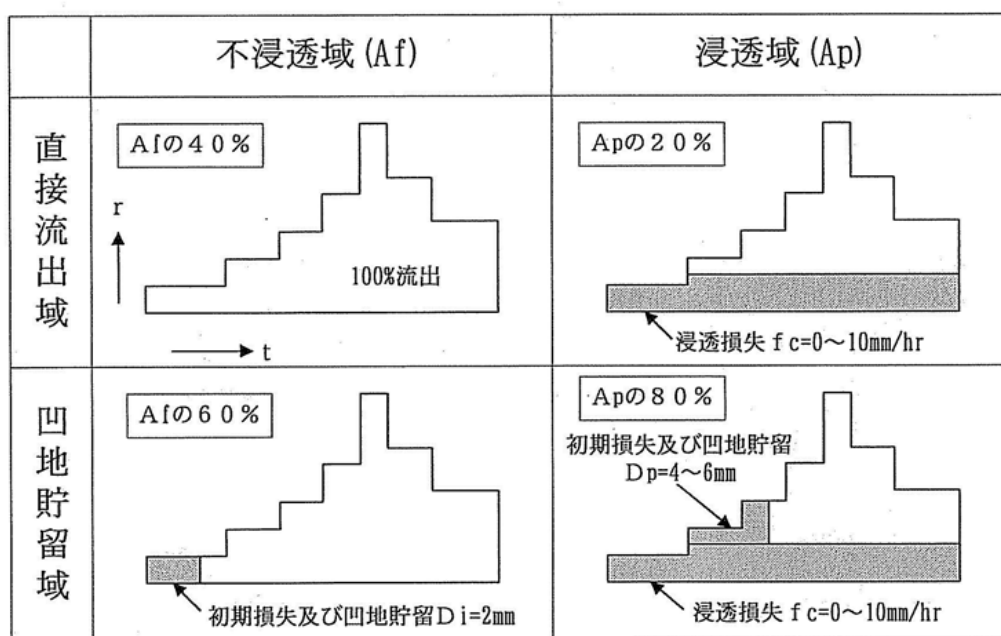


図 2.2.21 修正 RRL 法の有効降雨の一般的な考え方

(3) 流出係数の設定

流出係数は、一般的な下水道計画値を土地利用に応じて設定した。

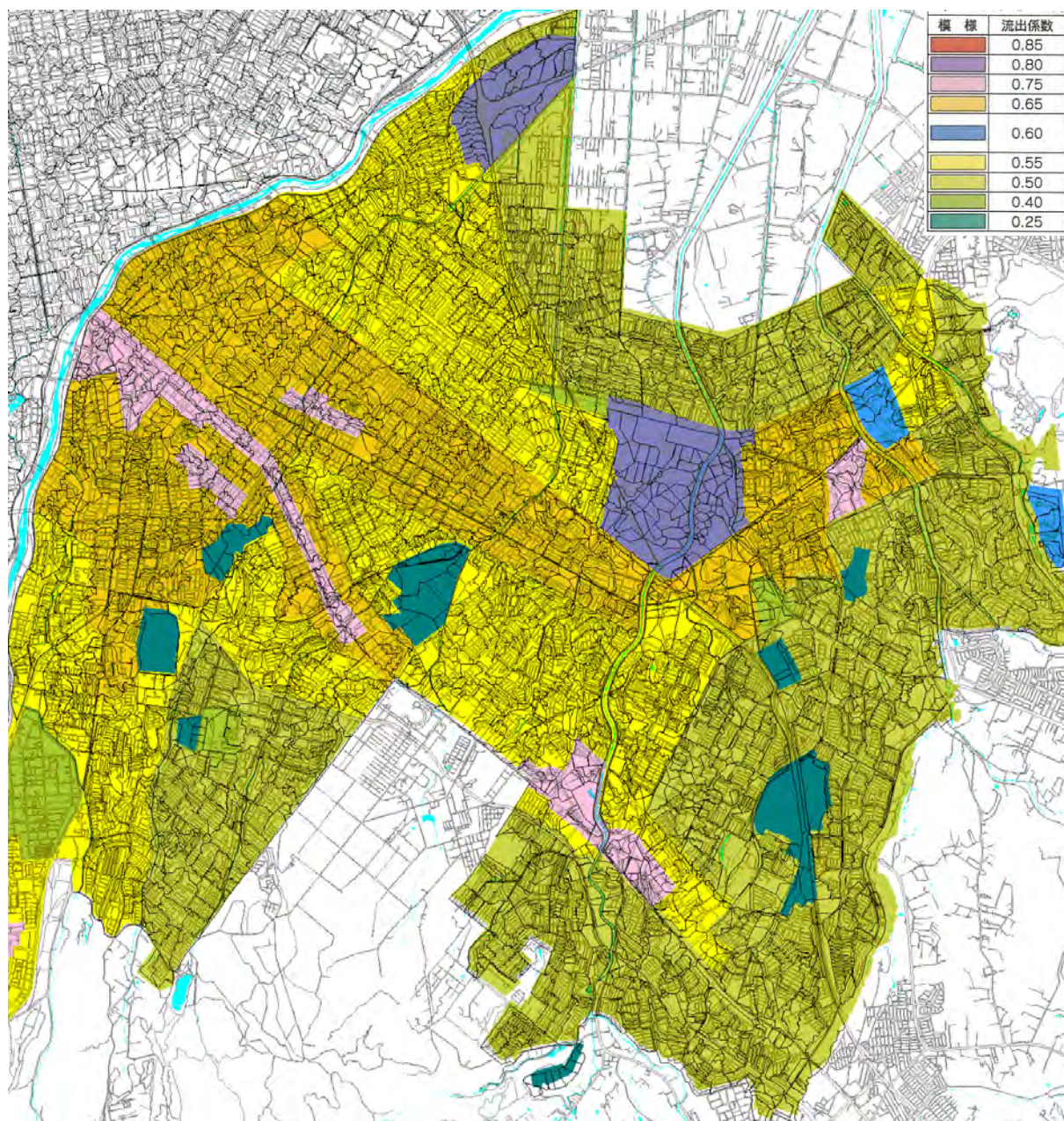


図 2.2.22(1) 流出係数の設定(豊平川右岸域)

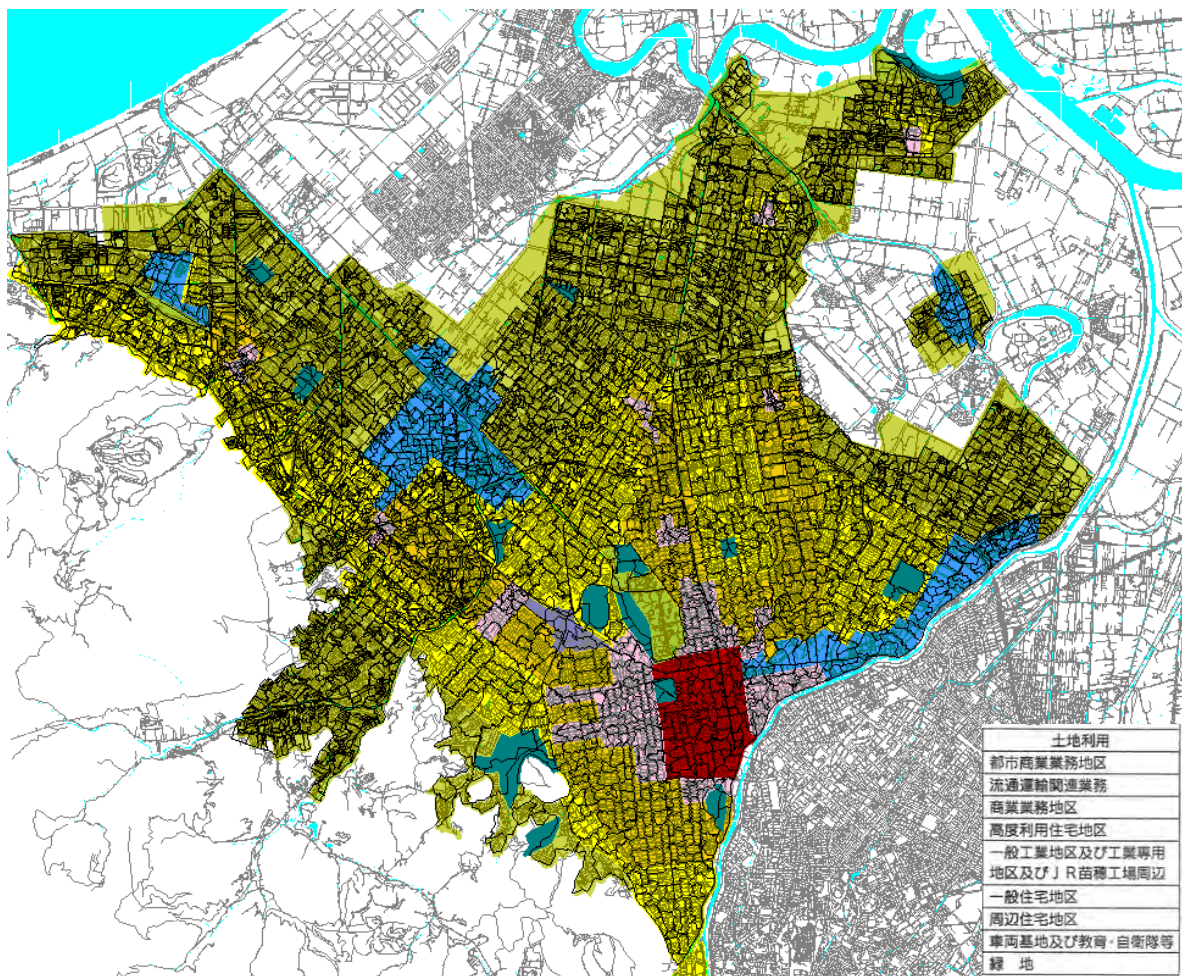


図 2.2.22(2) 流出係数の設定(豊平川左岸域)

(4) 到達時間(流入時間)の設定

集水域の集水面積，角屋式により到達時間を算定する．角屋式は，以下に示すように，流域の土地利用状態（開発前：山地等，開発後：下水道整備後），有効降雨強度，集水面積を用いて到達時間を算定するものである．

【角屋式】

$$t_c = C \cdot r_e^{-0.35} \cdot A^{0.22}$$

ここに、 t_c : 流達時間（分）
 C : 流域の土地利用状態等で決まる定数
（開発前： $C=180$ 、開発後： $C=60$ とする。）
 r_e : 有効降雨強度（mm/hr）
（降雨強度 r と流出係数 f との積）
 A : 集水面積（km²）

出典：下水道雨水調整池技術基準（案）解説と計算例 昭和59年10月
（社）日本下水道協会 p. 18

表 2.2.3 土地利用状況に応じた定数 C

土地利用状況	流出係数	定数C
都市商業業務地区	0.85	60
流通運輸関連業務	0.80	70
商業業務地区	0.75	80
高度利用住宅地区	0.65	100
一般工業地区及び工業専用地区	0.60	110
一般住宅地区	0.55	120
周辺住宅地区	0.50	130
車両基地及び教育・自衛隊等	0.40	150
緑地	0.25	180

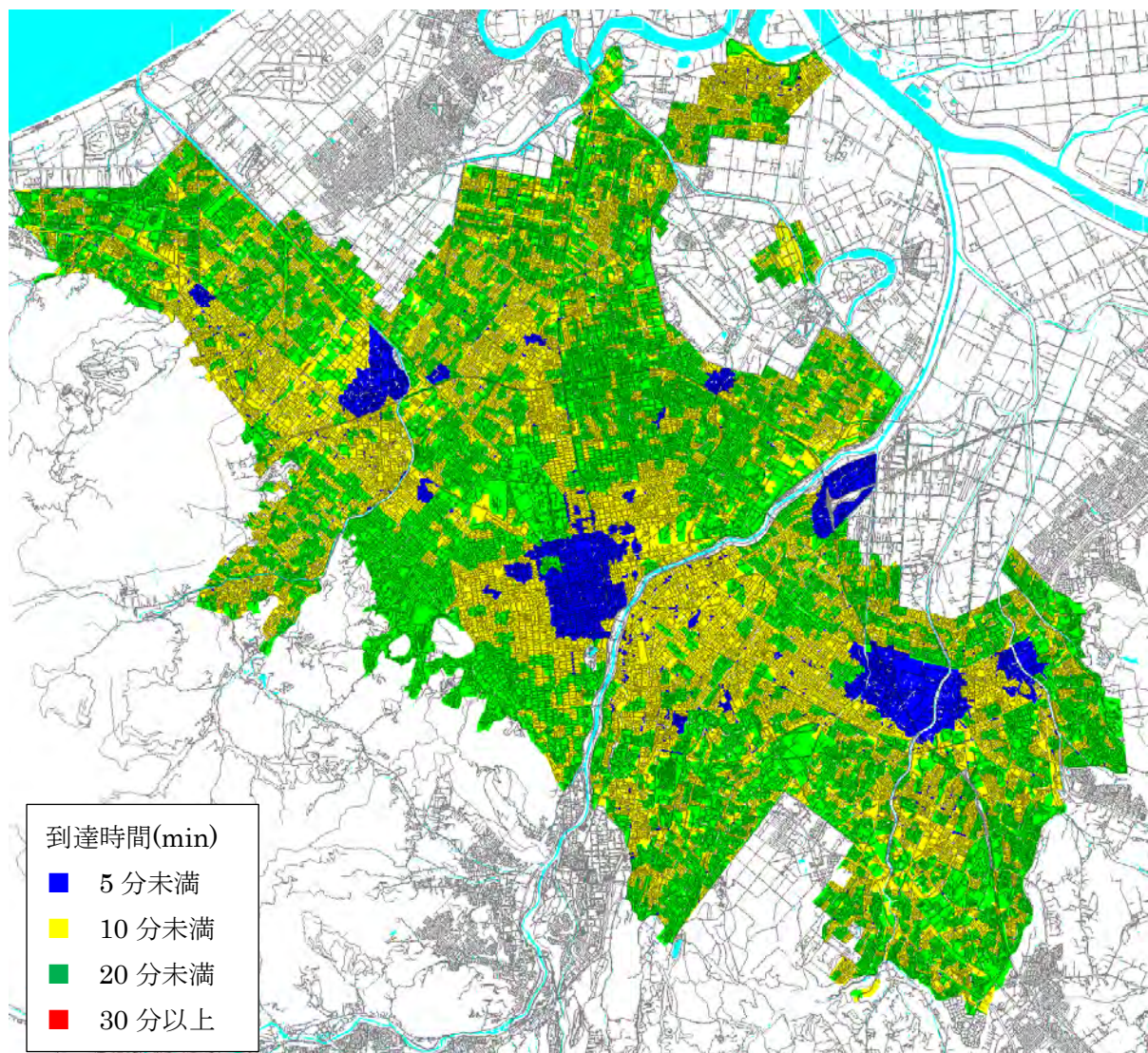


図 2.2.23 到達時間の設定

1) 流入ハイドログラフの算定方法

等到達時間毎に有効雨量を求め、それを単位時間毎にずらしながら合成したものが、流入ハイドログラフである。これは、 $S-Q$ 曲線により低減させて流出ハイドログラフを作成する前段階の仮定の流量波形である。

流入ハイドログラフの計算方法を以下に示す。

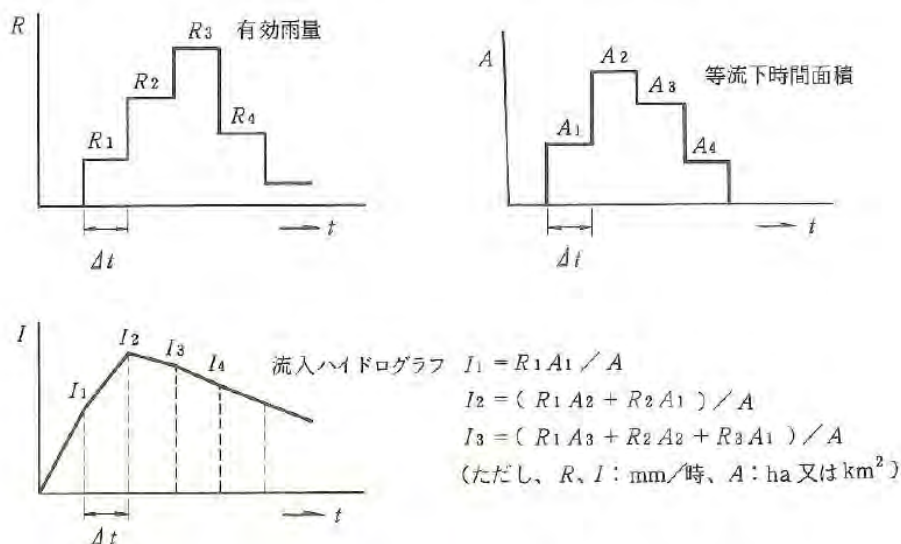


図 2.2.24 流入ハイドログラフ算定の概念図

2) S-Q 曲線の設定方法

1) で算定した流入ハイドログラフを入力値として、連続式と S-Q 関係を用いて流出ハイドログラフを求める。管路の S-Q 曲線は、「下水道雨水調整池技術基準（案）」に基づき設定した。同資料によると、管路の S-Q 曲線 $S=K \cdot Q^P$ の P は概ね 0.7 であることが既往検討からわかっている。よって、図 2.2.25 より、(4)で求めた流下時間に対する貯留量 S を求め、 $S=K \cdot Q^{0.7}$ に対する係数 K を設定する。

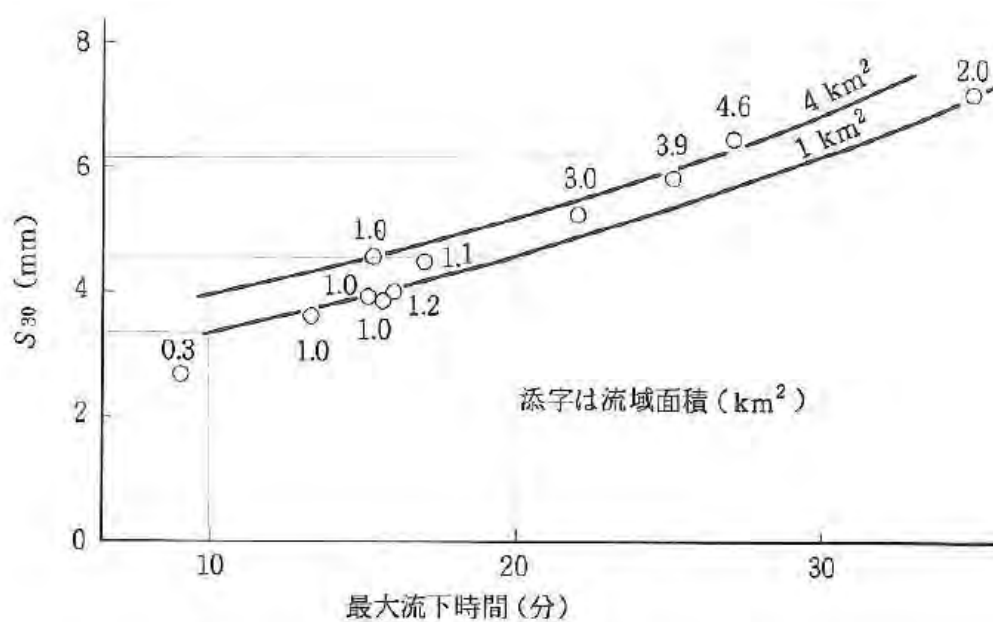


図 2.2.25 流下時間と貯留量の関係

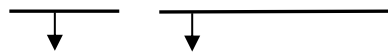
流出ハイドログラフは、流入ハイドログラフを流入量 I とし、 S - Q 曲線を用いて貯留による流量低減計算を行い、流出量 Q を求めることにより算定される。

連続の式を差分式に直して整理すると次のとおりとなる。

連続の式： $\frac{ds}{dt} = I - Q$

⇒差分式　： $\frac{S_2 - S_1}{\Delta t} = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{Q_1 + Q_2}{2}$

$$\frac{Q_2}{2} + \frac{S_2}{\Delta t} = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{Q_1}{2} + \frac{S_1}{\Delta t}$$



未知量　　既知量（第 1 ステップ目の Q_1, S_1 は 0 とする）

(5) 下水道追跡解析手法

本検討の下水道管路計算手法を以下に示す。

1) 一次元不定流解析モデルの概要

下水道を考慮した氾濫現象は、下水道管渠から地表面への溢水、地表面での湛水や流下、地表面から下水道管渠への流入など、複雑な水理現象である。これらの現象を解析するため、平面二次元不定流計算に下水道管渠を組み込んだ氾濫水理計算モデルを構築した。

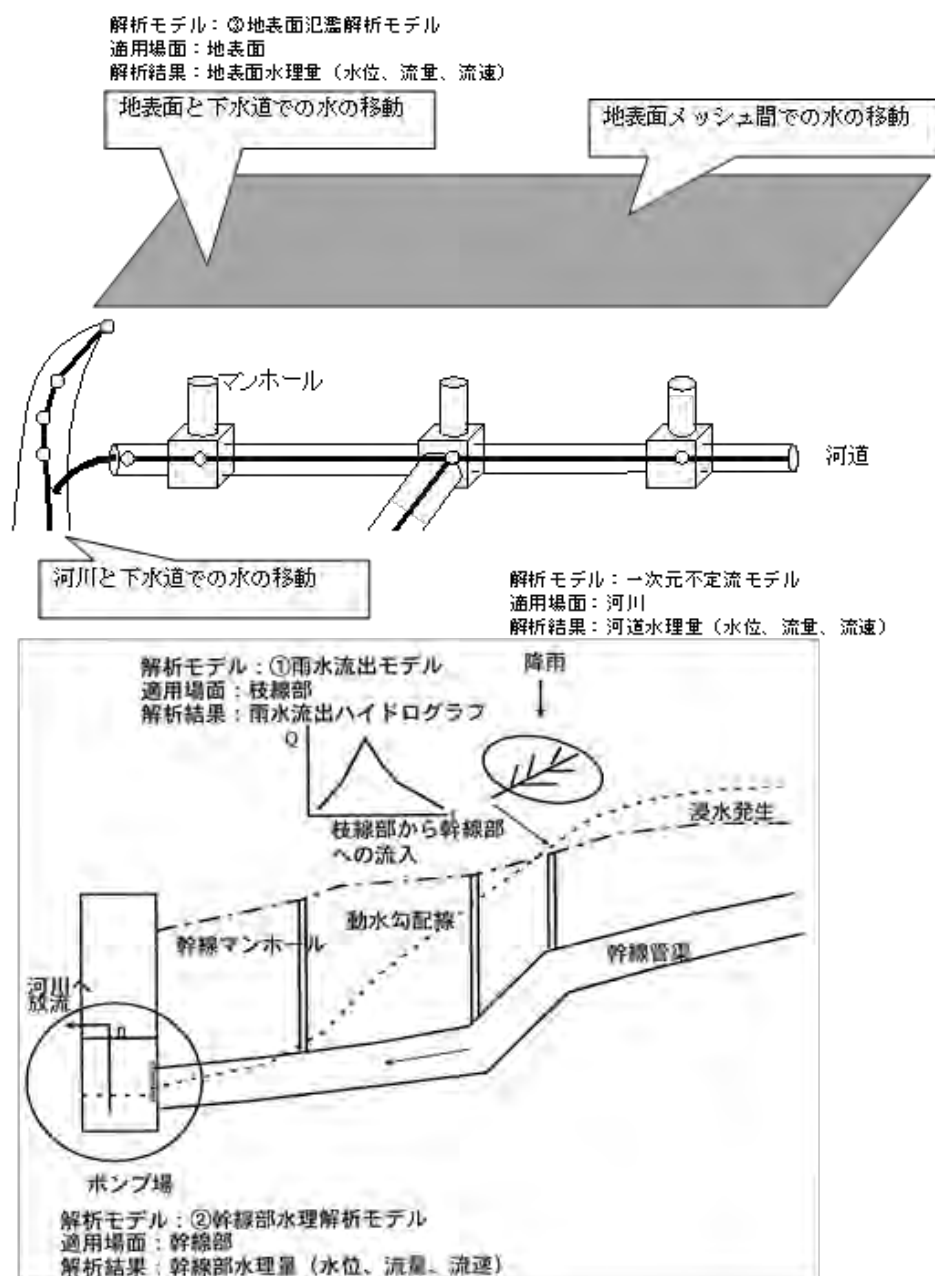


図 2.2.26 下水道を考慮した氾濫モデルの概念図

a) 基礎式等の解析手法の概要

下水道管路内の水位・流量は，一次元不定計算を用いて算定した．モデルの連続式及び運動方程式は以下に示すとおりである．

ア 管路モデル

[連続式]

$$\text{(開水路流れ)} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{in}$$

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{円管}), \quad A_0 = BH \quad (\text{矩形管})$$

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

ここに， A ：流水断面積， Q ：流量， q_{in} ：横流入量， n ：粗度係数， R ：径深， S_0 ：水路床勾配， B ：水面幅， H ， h ：水深， A_0 ：管路断面積， A_L ：管路断面積， L ：管路長さ， C ：圧力波速度， S_f ：摩擦損失勾配， k ：局所損失係数を表す．

イ 人孔からの溢水量・人孔への流入量算定の考え方

人孔からの溢水量・人孔への流入量は，地表面湛水位と管路のピエゾ水頭（動水位）との水頭差（ Δh ）と水理模型実験から得られた流量係数 C からオリフィス式で算出する．水頭差 Δh は，人孔上下流端の管路水位の平均をとるものとしている．

なお，溢水量・流入量算定の際に使用する人孔断面積 A は，人孔データで入力した値ではなく，水理模型実験で使用した人孔断面積（ $\phi 1000$ ）としている（実験で使用した模型は実際の施設の 1/5 である $\phi 200$ ）．

人孔断面積として $\phi 1000$ とした理由としては，地表面マンホール面積がオリフィスで算出する支配断面であること，実際のマンホールは維持管理上の規定で最小径が $\phi 900$ であることが挙げられる．

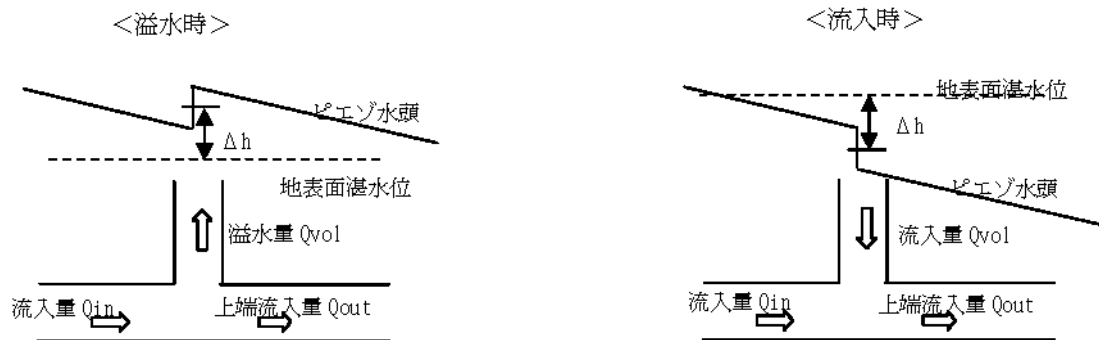


図 2.2.27 人孔からの溢水・流入量の計算方法

[連続式] $Q_{in} = Q_{vol} + Q_{out}$ （溢水時 $Q_{vol} > 0$ ，流入時 $Q_{vol} < 0$ ）

[運動式] $Q_{vol} = C \cdot A \sqrt{2g \cdot \Delta h}$

ここに， C ：水理模型実験から得られた流量係数（溢水：0.510 流入：0.341）， A ：溢水量・流入量算定に用いる人孔断面積（ $\phi 1000$ ）， Δh ：地表面湛水位と管路ピエゾ水頭平均との差（地表面湛水がない場合は人孔上の地盤高）

2.2.6 地表面氾濫計算モデルの構築

地表面の氾濫流の拡がりを算定するための平面二次元不定流モデルを構築した。地表面のメッシュ解像度は、窪地湛水もある程度評価できるように 10m メッシュで構築した。解析メッシュは、直交座標系の平面直角座標系で構築した。

(1) 地盤高データの作成

10m メッシュ平均地盤高は、基盤地図情報の数値標高モデル 5m メッシュデータを活用し、単純平均により設定した。なお、上記 5m グリッドデータの存在しない範囲については、数値地図 50m メッシュ標高を用いた。氾濫解析に使用する 10m メッシュ平均地盤高コンター図を図 2.2.28 に示す。

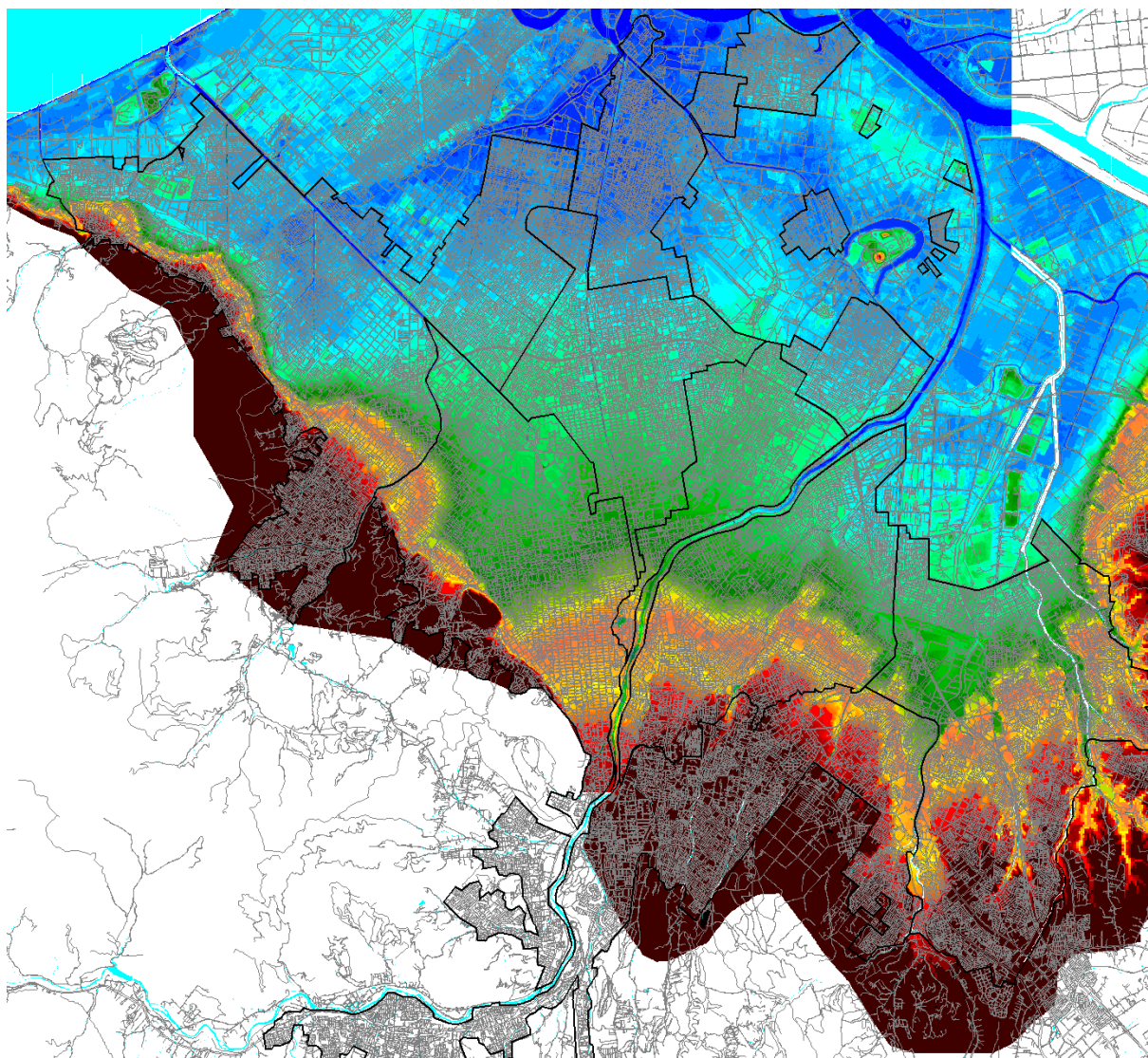


図 2.2.28 10m メッシュ平均地盤高コンター図

(2) 建物占有率の設定

建物占有率は、各メッシュにおける建物面積の占有割合を基盤地図情報の建物外周線から各メッシュの占有率を算定し設定した。氾濫原のメッシュサイズは 10m メッシュであるため、特に宅地の密集した区域では、建物占有率が 1.0（図中赤色）となるメッシュがある。このようなメッシュについては、完全に水が流れないメッシュが存在しないよう、建物占有率の上限値を 0.95 とした。氾濫解析に使用する 10m メッシュ建物占有率の分布図を図 2.2.29 に示す。

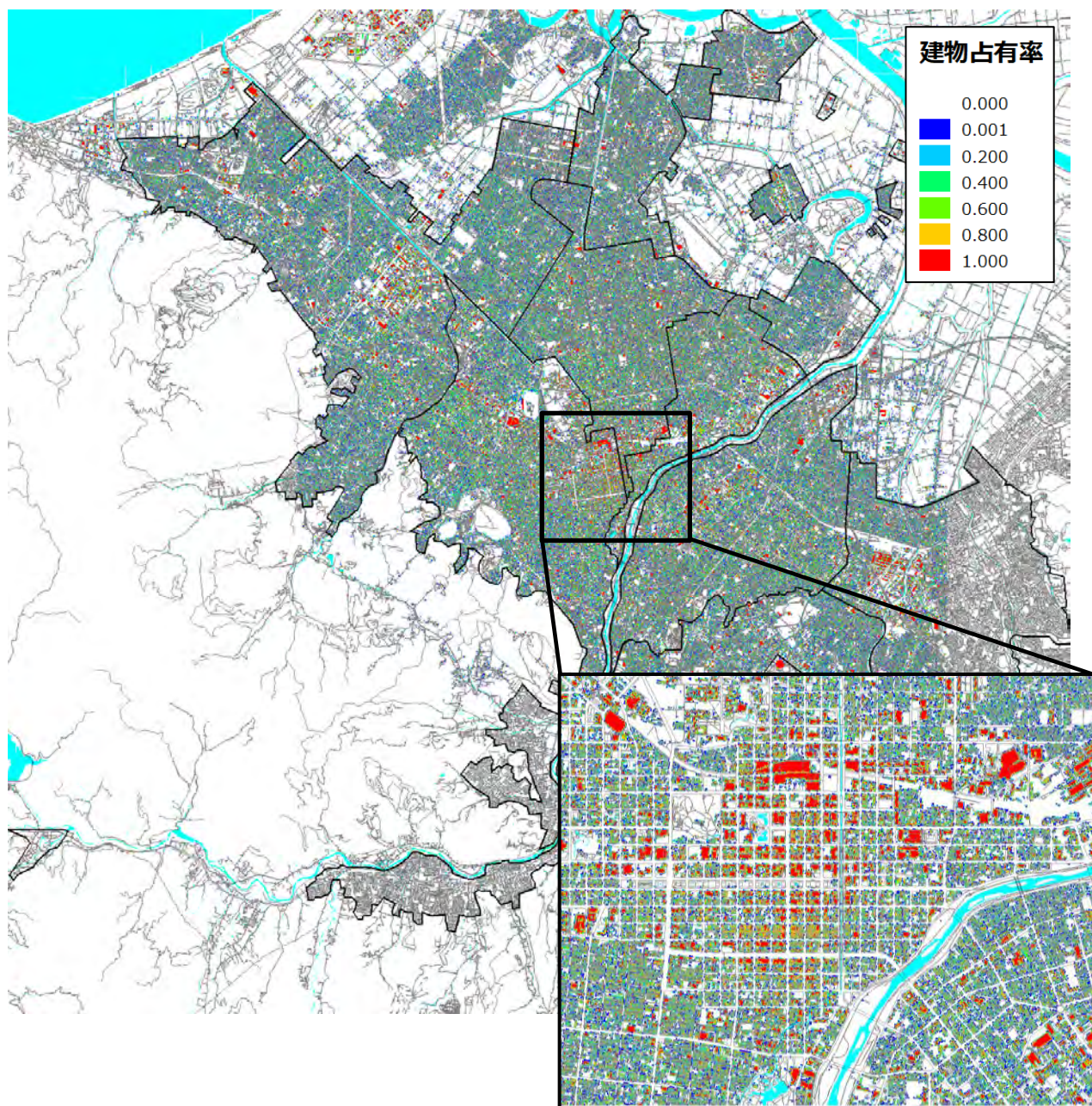


図 2.2.29 建物占有率の分布

(3) 氾濫原粗度係数の設定

氾濫原の粗度係数については、「浸水想定区域図作成マニュアル（H27.7）」に則り，土地利用に応じて表 2.2.4 のように設定した．土地利用状況は，図 2.2.30 に示す国土数値情報の土地利用メッシュ（H21,100m メッシュ）をもとに，オーバーラップする氾濫原 10m メッシュの面積比率で設定した．底面粗度係数は，基本的には氾濫シミュレーション・マニュアルに示されている土地利用別の値を用いた．ただし，道路は，既往の模型実験や論文等から他の土地利用よりも流下しやすい状況が確認されていることから，0.020 を用いた．また，水域は，「浸水想定区域図作成マニュアル（H27.7）」に示されている 0.025 を用いた．土地利用毎に設定した粗度係数の値は，図 2.2.30 に併せて示した．

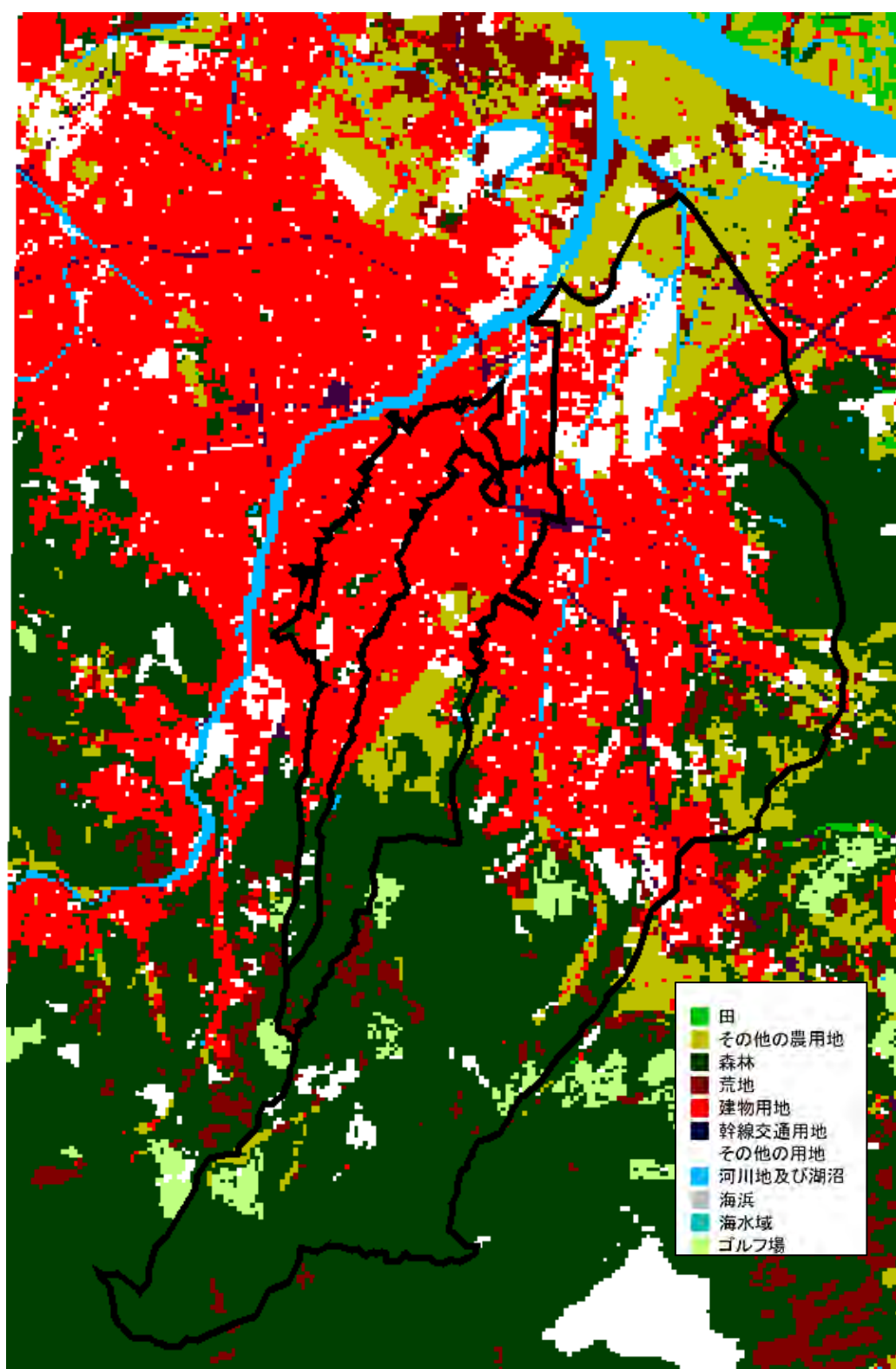
表 2.2.4 土地利用に対する粗度係数設定値

土地利用	粗度係数
市街地	0.050
農地	0.060
林地	0.060
水域	0.025
その他(空地・緑地)	0.050
道路	0.020

また，氾濫原粗度係数は，建物占有率を考慮した下式より算定した．

$$n^2 = n_0^2 + 0.020 \times \frac{\theta}{100 - \theta} \times h^{4/3}$$

ここに， θ = 建物占有率
 h = 水深
 n = 合成粗度係数



※ 出典：国土数値情報 土地利用メッシュ（平成 21 年）

図 2.2.30 土地利用分布図（豊平川右岸域）

2.3 内外水同時解析モデルの精度検証

本研究の内外水同時解析モデルの精度検証を、札幌市を対象に構築したモデルを対象に実施した。内外水同時解析モデルの精度検証は、以下に示す項目で実施することが可能である。著者は、札幌市を対象に複数降雨を対象に河川の水位観測所と計算水位を比較することで再現性の検証を実施した。一方で、浸水実績範囲等の検証は、実績の浸水範囲等の検証材料が十分に存在しておらず十分に実施することができてないのが課題となっている。

著者は、札幌市で令和3年8月4日の降雨で発生した内水氾濫を現地踏査において確認した。この現地踏査結果等を用いて内外水同時解析モデルの検証計算を実施し、解析モデルの改良を実施した。

【内外水同時解析の検証項目】

- ①河川の観測水位の検証
- ②下水道の観測水位の検証
- ③下水道処理施設の排水量の検証
- ④浸水実績範囲等の検証

2.3.1 令和3年8月4日降雨を対象とした検証計算

令和3年8月4日に、図 2.3.3 に示すように札幌市の清田区と厚別区において局所的な集中豪雨が発生した。この降雨で北海道と札幌市管理する三里川の水位が上昇し、図 2.3.1 に示すように氾濫開始水位を超過し河川の越水が発生した。著者は、図 2.3.2 に示すように豪雨時に現地踏査を行い道路冠水程度の内水氾濫が発生していることを確認した。本検討では、令和3年8月4日降雨を対象に内外水同時解析モデルの検証を実施した。

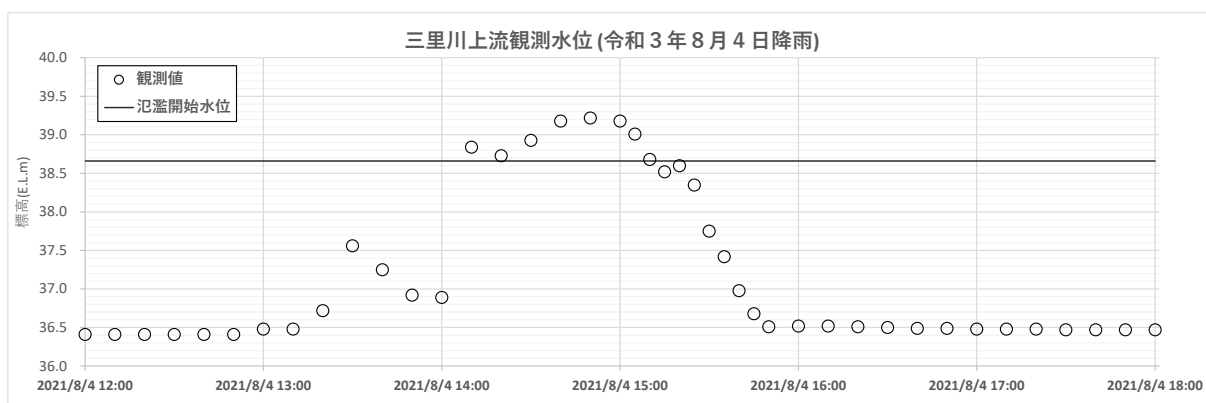


図 2.3.1 三里川上流地点の観測水位(令和3年8月4日)



図 2.3.2 道路冠水状況(令和3年8月4日14時53分(平岡3条))

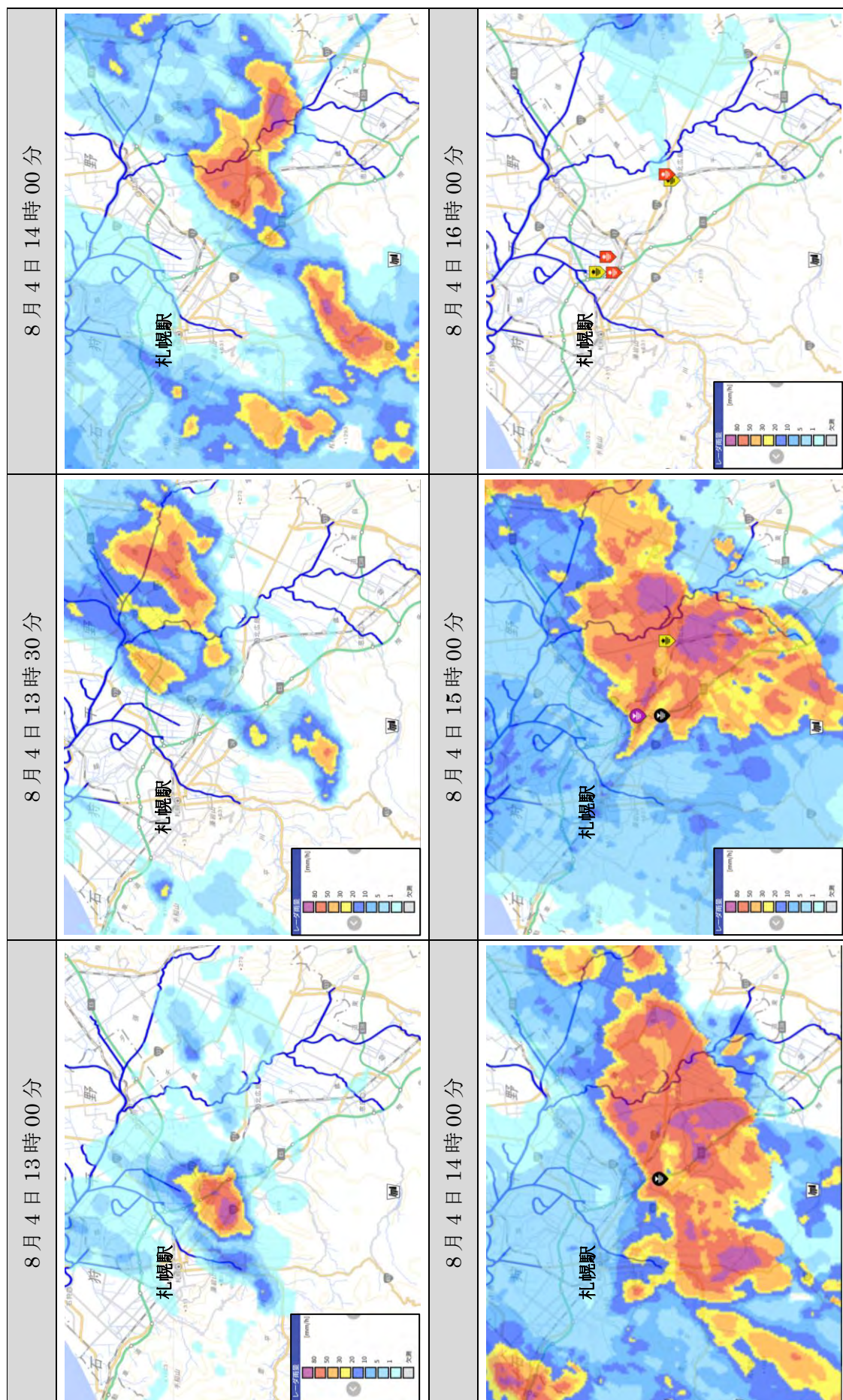


図 2.3.3 令和3年8月4日降雨のレーダー観測雨量

(1) 三里川の概要

三里川は、札幌市の南東部に位置しており石狩川水系豊平川の支川である厚別川の支川の1 河川である。図 2.3.5 に示すように三里川は、厚別区と清田区の市街地を貫流する河川となっており、降雨時の水源は上流域の里塚地区からの下水道排水となっている。三里川の周辺は下水道網が整備されており、図 2.3.6 に示すように 18 箇所の下水道の吐口が整備されている。表 2.3.1 に三里川の諸元を、図 2.3.4 に三里川の河床高縦断面図を示す。

表 2.3.1 三里川の諸元

項目	諸元	備考
流路延長	6.4km	
流域面積		
河床勾配	0.0k～4.8k : 約 1/300(セグメント 1) 4.8k～6.4k : 約 1/100(セグメント 1)	
下水道吐口	18 地点	

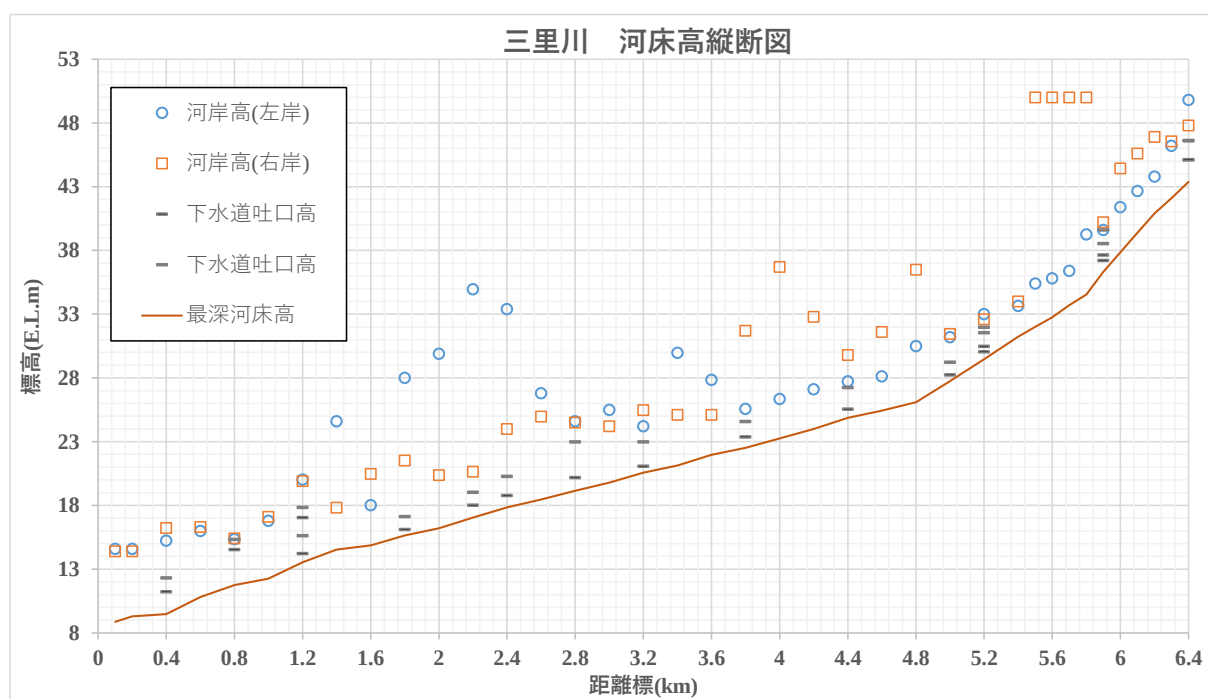


図 2.3.4 三里川の河床高縦断面図と下水道吐口位置



図 2.3.5 三里川の位置図(航空写真：平成 18 年撮影)

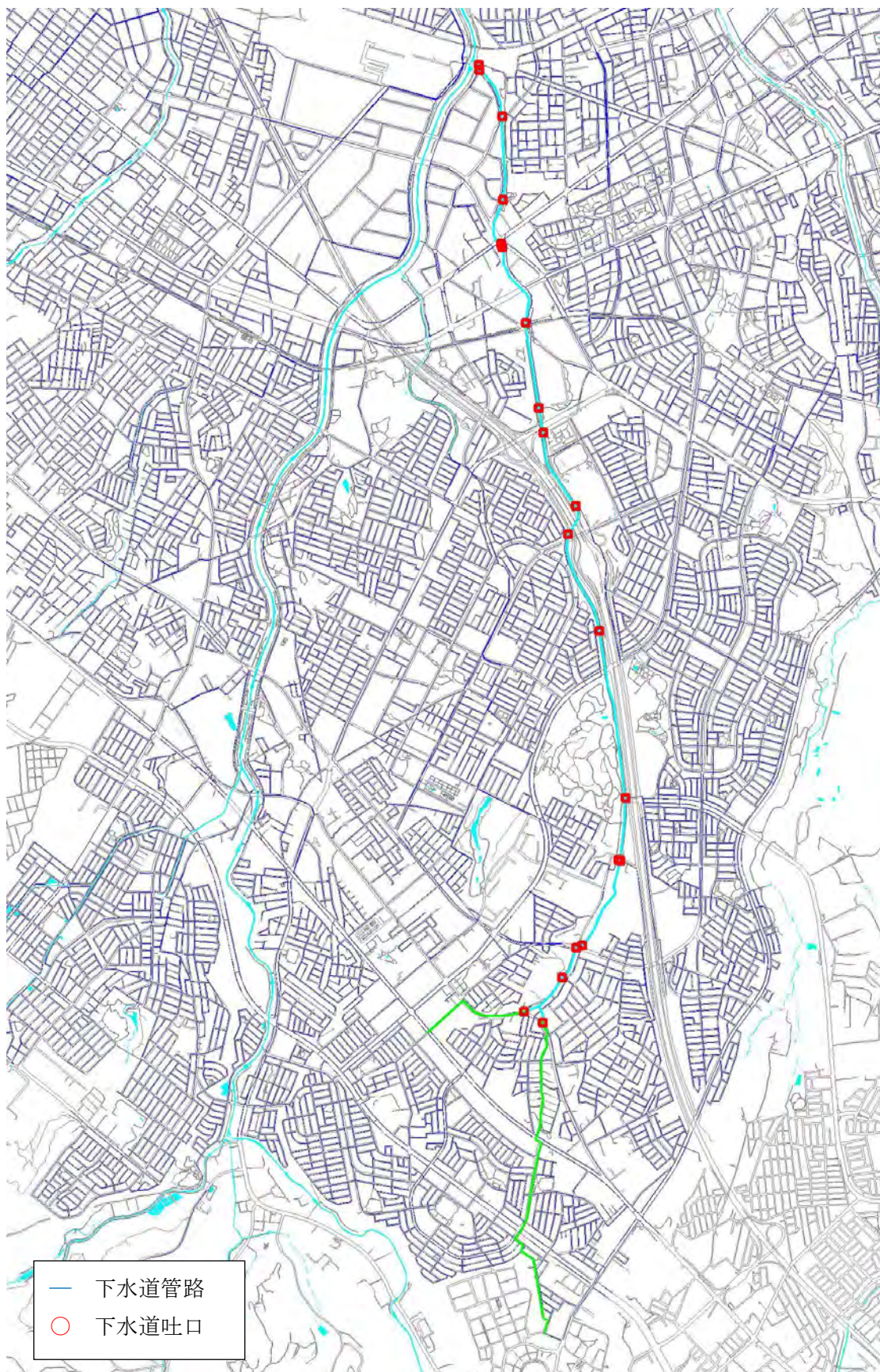


図 2.3.6 三里川の雨水下水道と吐口の位置図

(2) 令和3年8月4日降雨の観測雨量

令和3年8月4日の降雨観測値を、札幌市が設置しているマルチセンサーの観測雨量を用いて整理した。三里川周辺のマルチセンサーの位置図を、図 2.3.7 に示す。令和3年8月4日の札幌市内のマルチセンサーの観測雨量を表 2.3.2 に示すように整理すると、三里川の周辺の雨量観測所のみで札幌市の下水道の整備目標 35mm/hour を超過する降雨が発生している。図 2.3.8 に令和3年8月4日降雨の日雨量と最大時間雨量の比較図を示しており、三里川上流の里塚霊園地点では、最大時間雨量 59mm、日雨量が 71mm となっており短期間かつ局所的に生じた降雨イベントであることが分かる。三里川周辺の観測雨量を表 2.3.2 に示す。

表 2.3.2 令和3年8月4日の降雨のマルチセンサー観測雨量

観測所名	総雨量 (mm/day)	最大時間雨量 (mm/h)	観測所名	総雨量 (mm/day)	最大時間雨量 (mm/h)
中央区土木センター	6.50	5.50	福井中央公園	9.00	8.50
北区土木センター	7.00	6.00	平和霊園	12.00	10.00
東区土木センター	5.50	4.00	手稲水再生プラザ	0.00	0.00
白石区土木センター	25.00	13.00	道立小児総合保健センター	0.00	0.00
厚別区土木センター	33.50	13.00	花川南中継ポンプ場	0.00	0.00
豊平区土木センター	30.50	21.50	サポートセンタープラザ	0.00	0.00
南区土木センター	17.00	12.50	高岡小中学校跡地	0.00	0.00
西区土木センター	15.00	5.50	石狩斎場	0.00	0.00
手稲区土木センター	15.50	15.50	茨戸水再生プラザ	0.00	0.00
南16条西4丁目道路用地	20.00	18.00	当別町下水終末処理場	5.00	2.50
円山公園坂下野球場	8.00	6.50	金沢会館	0.00	0.00
盤渓配水池	14.00	9.50	榎本公園	0.00	0.00
北26条通り西8丁目	7.00	4.50	上江別南町公園	15.50	8.50
新琴似グリーン公園	8.50	6.50	大森東公園	0.00	0.00
拓北水再生プラザ	7.00	4.00	野幌農村環境改善センター	0.00	0.00
農業支援センター	6.50	3.50	島松寿町会館	38.00	20.00
札幌公園	4.00	2.50	北広島市西部小学校	71.50	52.00
一条大橋橋台広場	6.50	4.00	北広島市西の里配水池	75.00	45.00
大谷地流通団地東緑地	31.50	17.00	篠路アンダーパス	6.50	5.00
平岡公園	74.00	28.50	百合が原公園アンダーパス	8.50	6.50
清田区土木センター	51.00	39.50	新川アンダーパス	10.00	7.00
西岡公園	31.50	27.50	菊水アンダーパス	7.00	3.50
里塚霊園	71.00	59.00	もみじ台通アンダーパス	24.00	10.50
中の沢雨水調整池	9.50	7.00	上野幌アンダーパス	71.00	31.00
石山児童会館	19.00	17.50	創成トンネル	6.00	4.00
藤野公園	16.00	10.00	エルムトンネル	6.50	5.50
定山溪水再生プラザ	13.50	10.00	平岡跨道橋	54.50	22.00
滝野自然学園	46.00	37.00	大谷地跨道橋	55.00	22.00

※赤字箇所が札幌市の下水道整備目標値 35mm/hour 超過地点

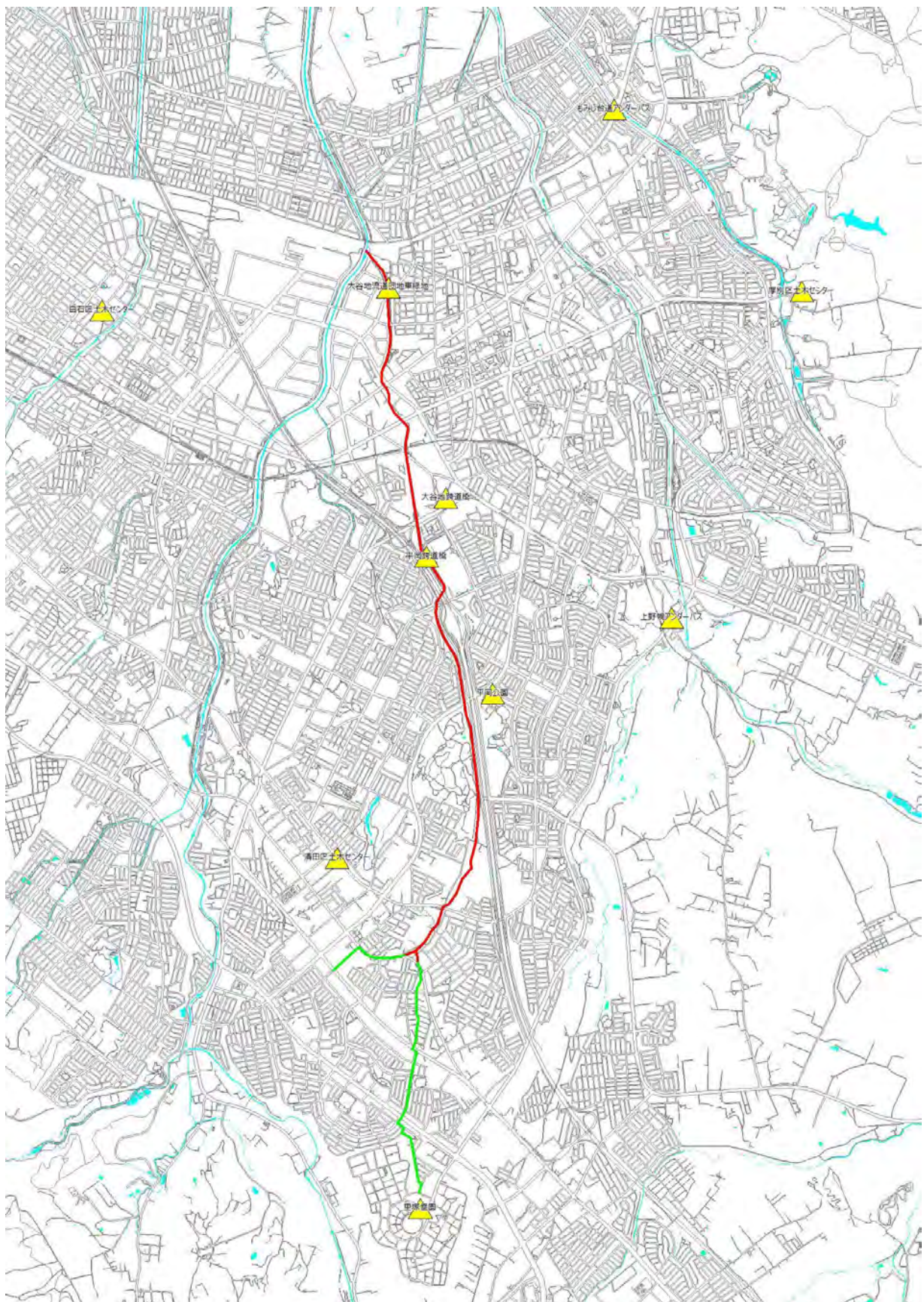


図 2.3.7 三里川周辺のマルチセンサー位置図

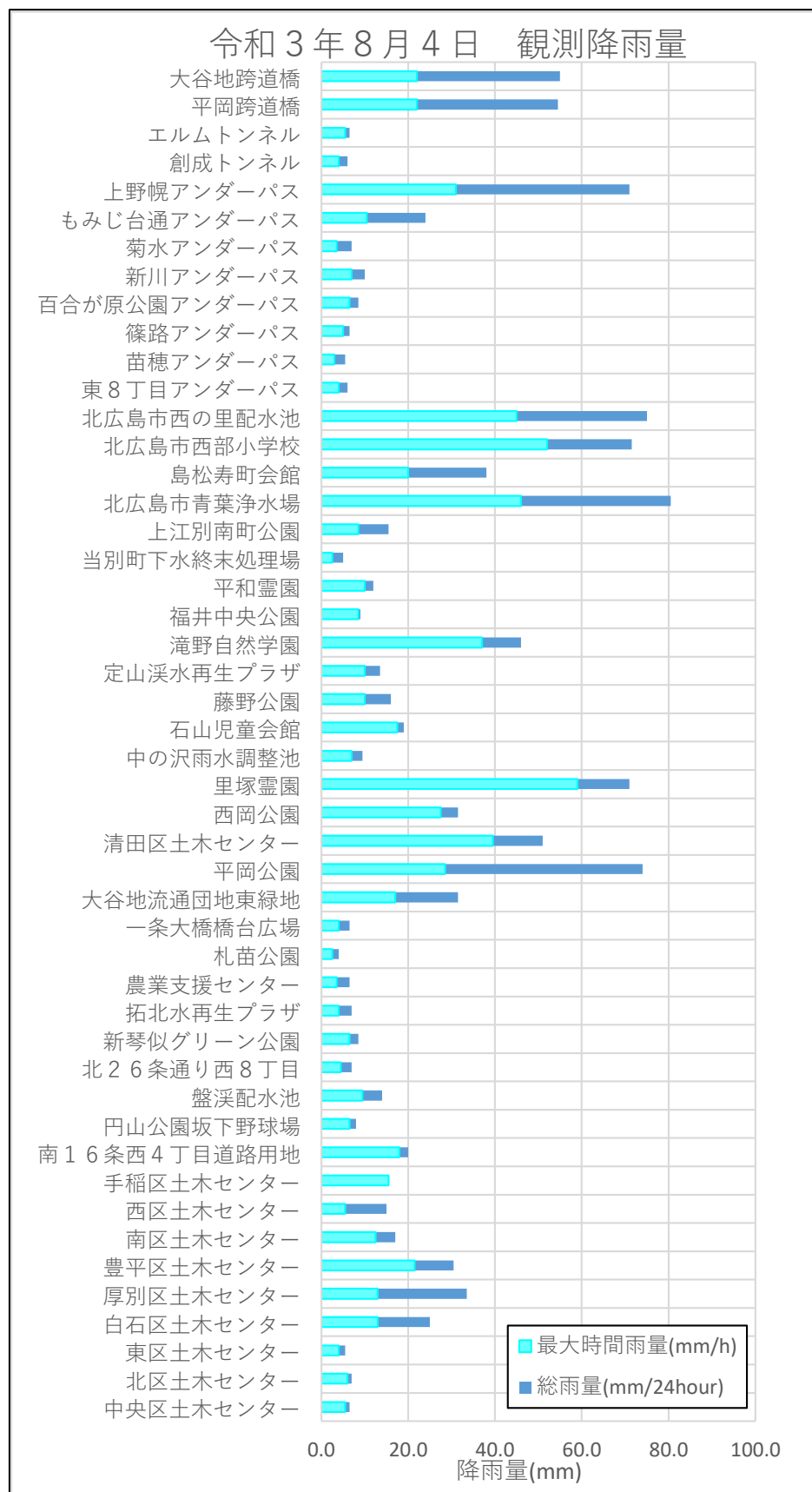


図 2.3.8 令和 3 年 8 月 4 日の雨量の最大時間雨量と日雨量の比較

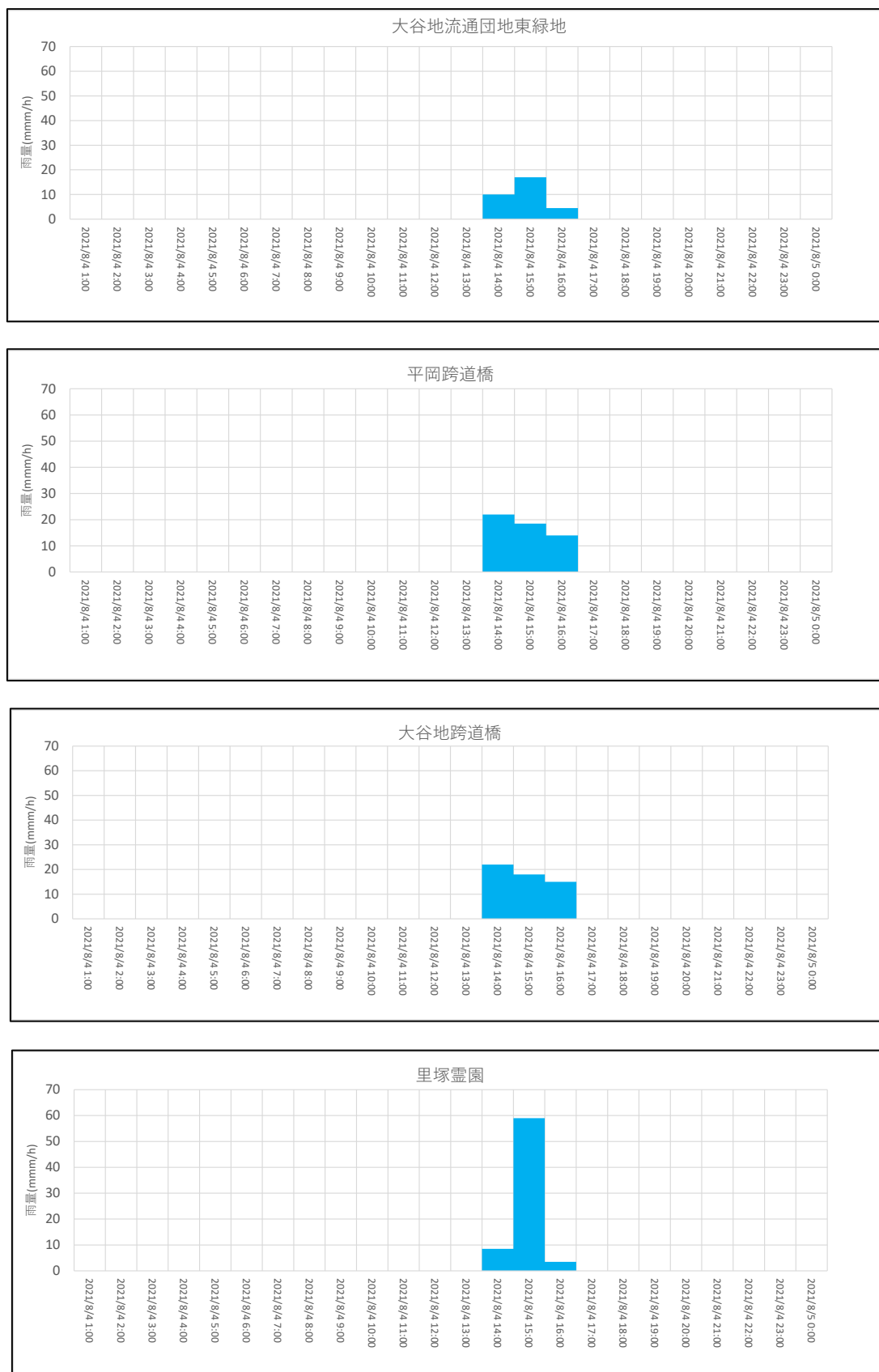
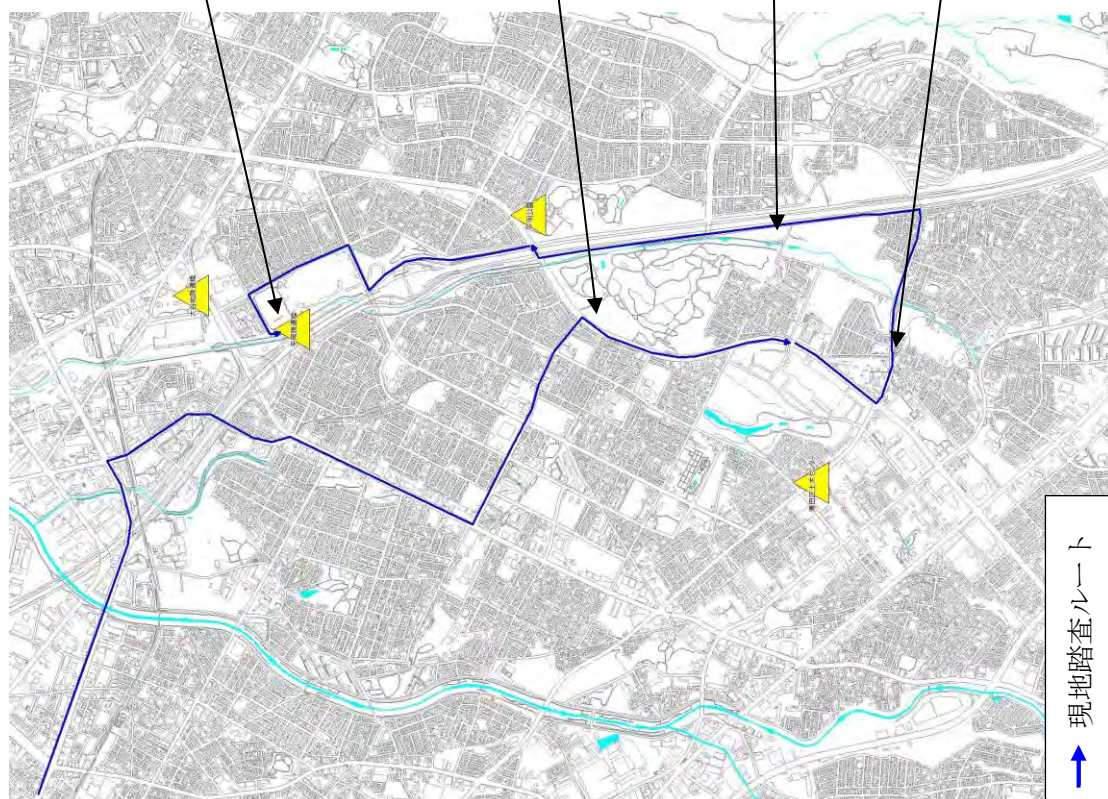


図 2.3.9 令和 3 年 8 月 4 日の観測雨量

(3) 令和３年８月４日における浸水被害の整理

令和３年８月４日降雨における浸水被害を整理した。浸水被害は、著者が降雨時に実際に現地踏査で確認した地点と、札幌市から提供いただいた住民からの浸水発生履歴を用いて整理した。現地踏査は、図 2.3.10 に示すルートで調査を実施した。平岡公園周辺の道路では、内水氾濫によって道路冠水の発生を確認した。また、札幌新道ではマンホールからの溢水を確認することができた。その後、三里川の状況を確認すると河道内を満水で洪水流が流下しているのを確認した。

現地踏査で確認した浸水発生箇所と住民からの通報履歴を整理し、図 2.3.11 に示すように浸水発生箇所の位置図を作成した。浸水発生箇所の地形的な特性を分析するために、基盤地図情報の数値標高モデルを用いて地盤高コンター図を作成した。地盤高コンター図のメッシュ解像度は 5m メッシュデータを用いた。浸水発生箇所と地盤高を比較すると、周囲に比べて地盤高が低い箇所で浸水が発生していることが確認できた。



↑ 現地踏査ルート



図 2.3.10 令和3年8月4日の現地踏査ルートと調査結果

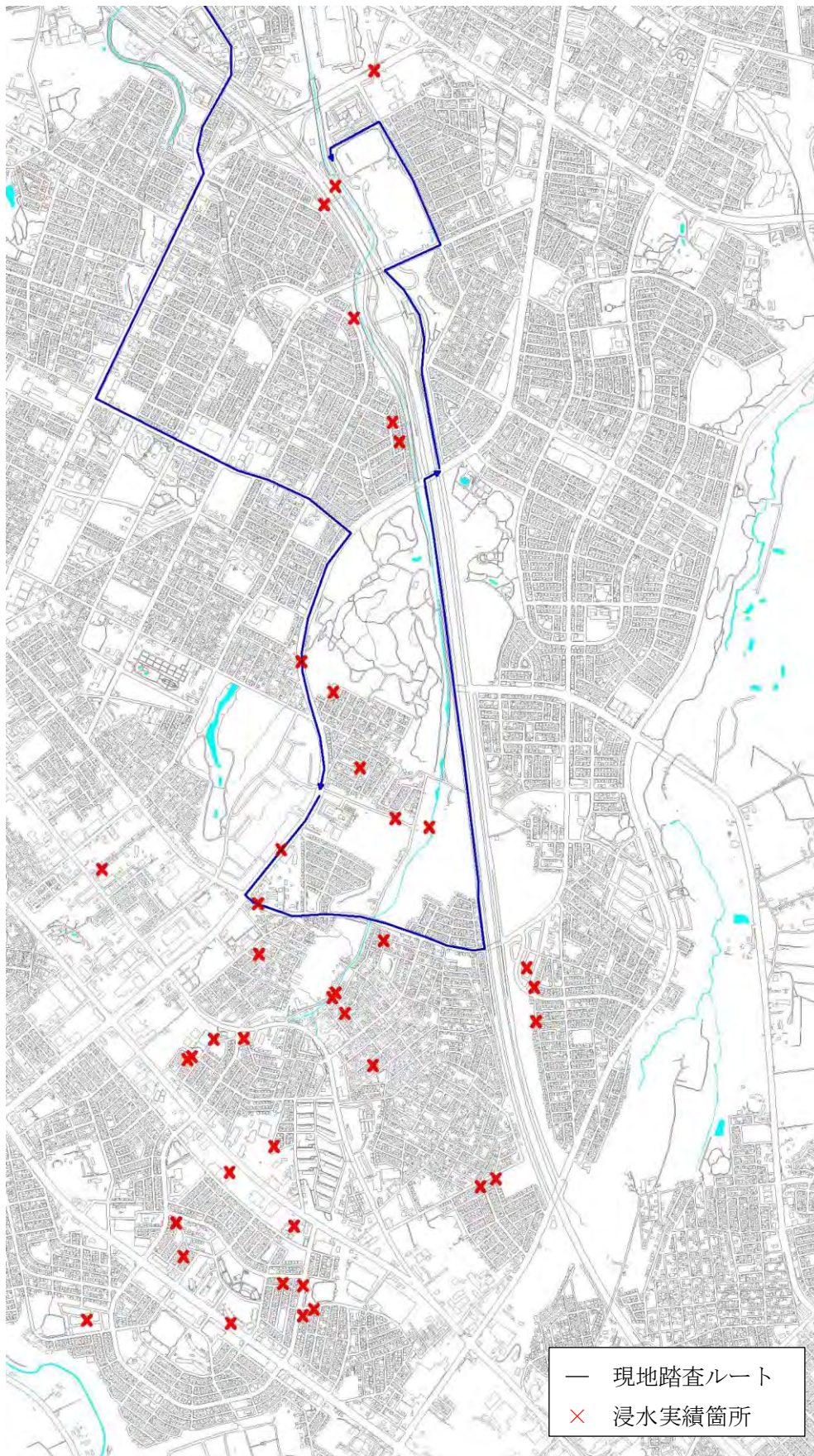


図 2.3.11 令和 3 年 8 月 4 日降雨での浸水実績箇所の位置図

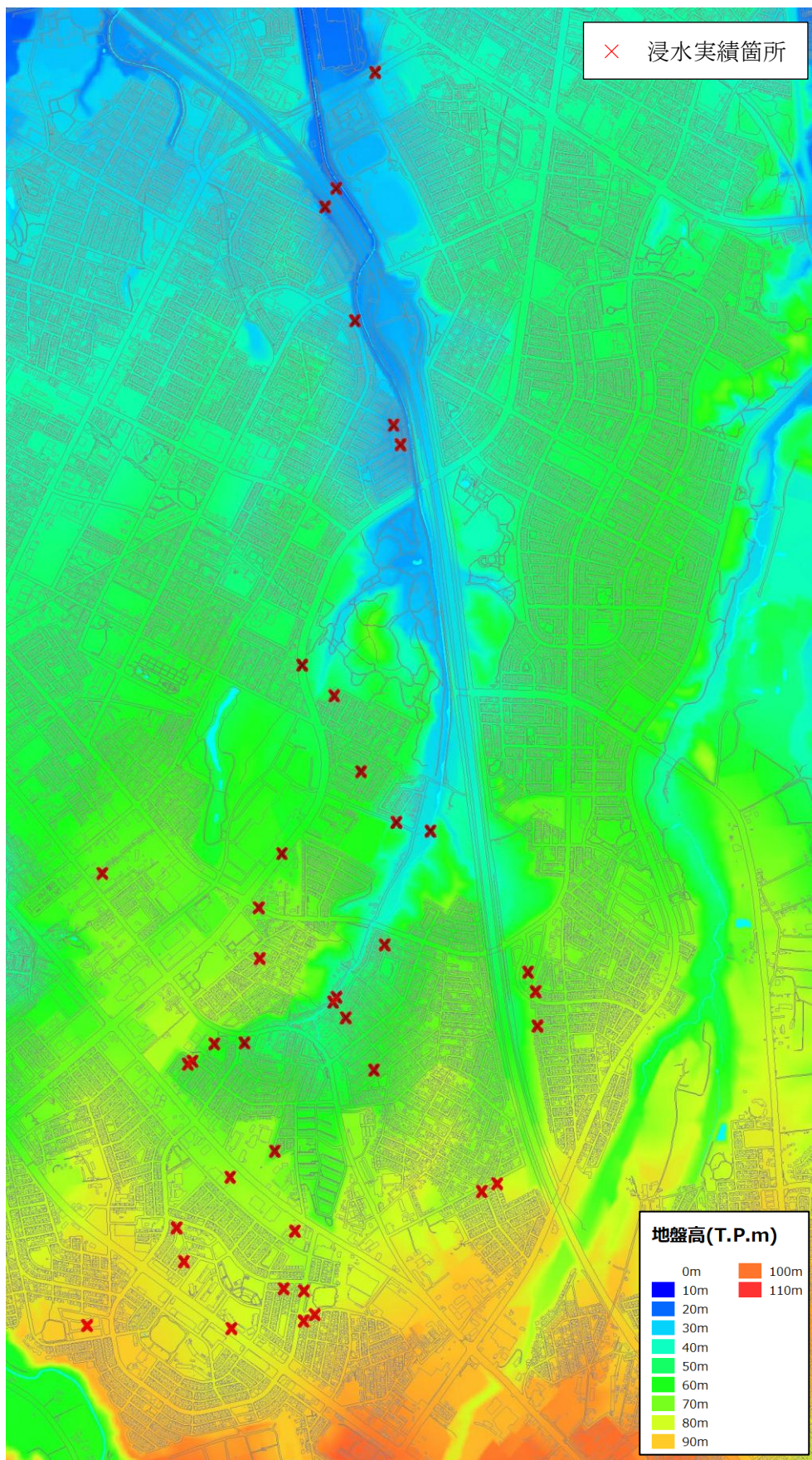


図 2.3.12(1) 令和 3 年 8 月 4 日降雨での浸水実績箇所と地盤高

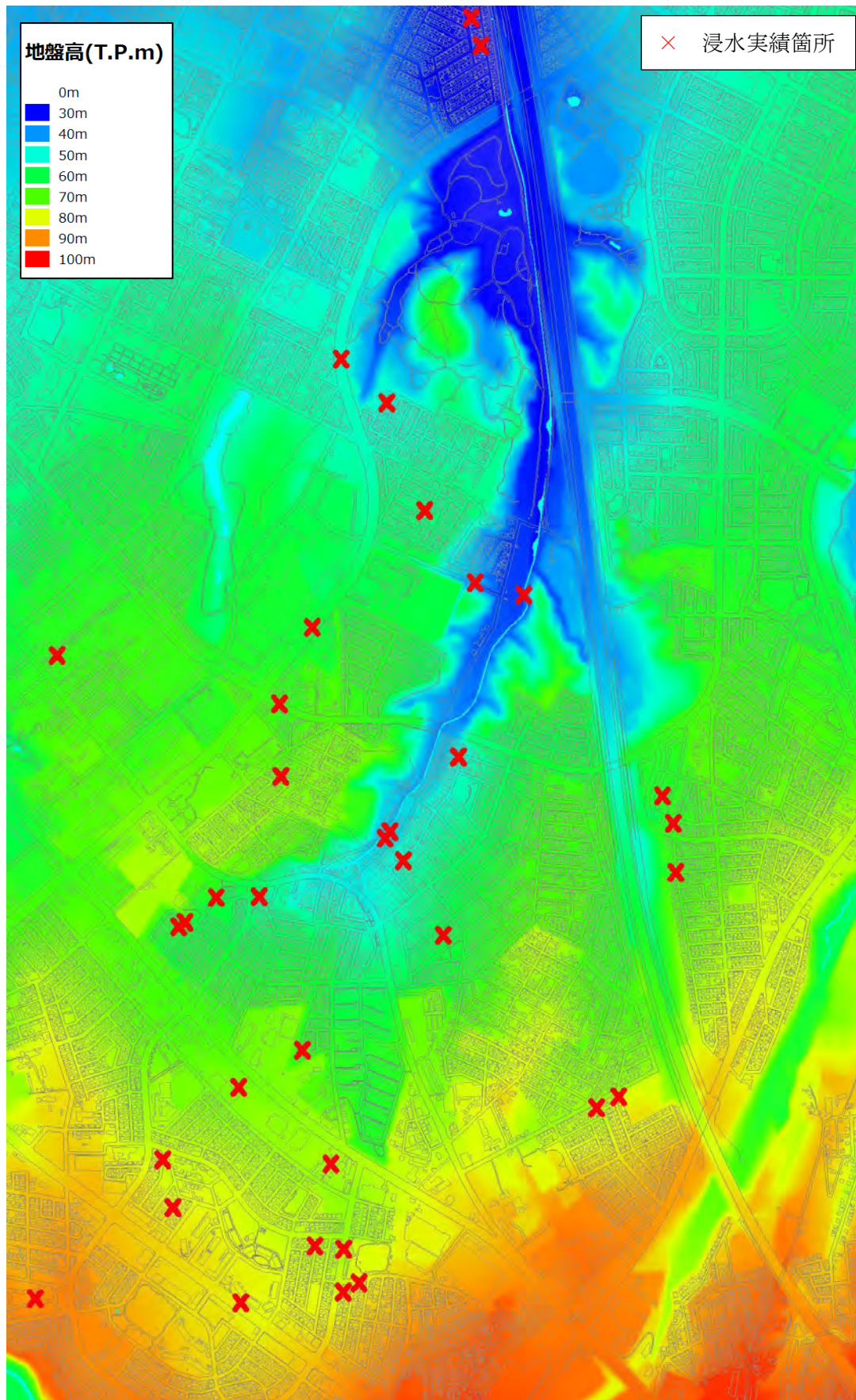


図 2.3.12(2) 令和 3 年 8 月 4 日降雨での浸水実績箇所と地盤高

(4) 令和3年8月4日降雨を対象とした検証計算

内外水同時解析モデルを用いて令和3年8月4日降雨を対象に検証計算を実施した。解析に用いる降雨データは、札幌市のマルチセンサー観測値を使用した。降雨量の空間分布は、図 2.3.14 に示すようにティーセン分割を実施し、各マルチセンサーの雨量を下水道の集水区に設定した。外力条件として与える雨量の時間解像度は、図 2.3.13 に示すように実績の 10 分雨量を用いたケースと 1 時間雨量を 10 分雨量に平均化した時間雨量値の 2 種類で解析を実施した。

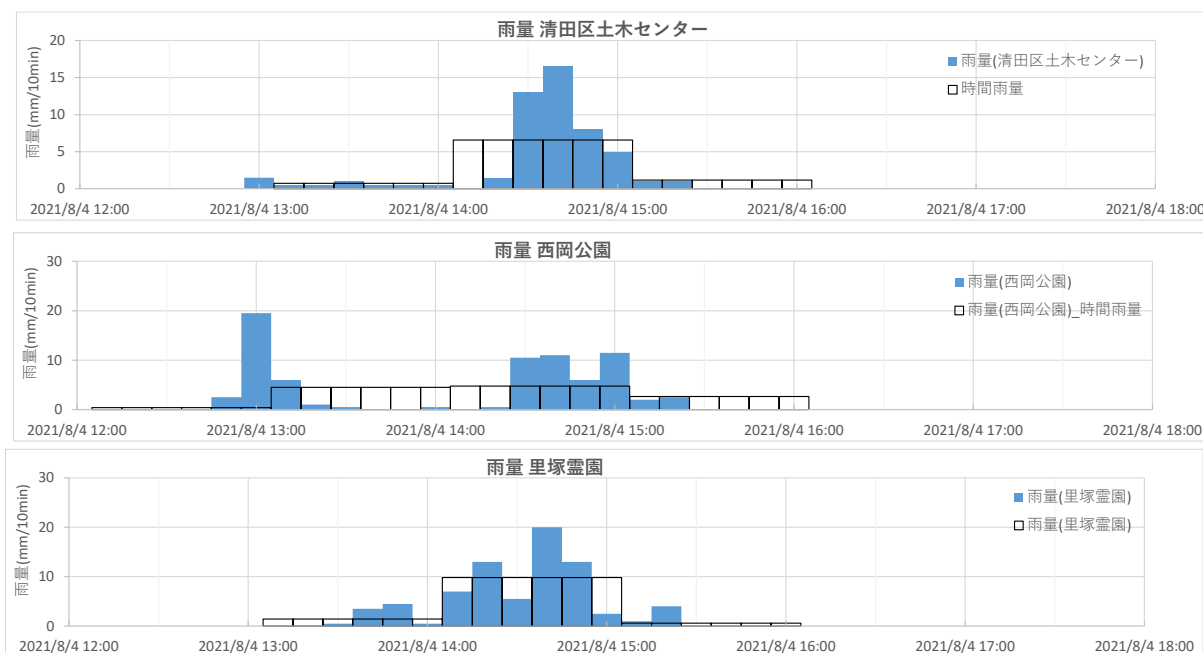


図 2.3.13 降雨データの時間解像度(時間雨量と 10 分雨量の比較)

表 2.3.3 検証計算条件一覧表

項目	設定条件
解析モデル条件	【下水道管路のモデル化条件】 対象管路：管路 600mm 以上の管路(図 2.3.15 参照) 対象人孔：管路 600mm 以上の管路に接続される人孔 整備時点：令和元年度 集水区：管径 600mm 以上の管路網に応じて設定 人孔の溢水高：人孔の溢水高は、人孔位置の 10m 地盤高を設定
	【下水道流出解析の条件】 流出率：既往研究でキャリブレーションした値を使用(流出率 0.75～0.85 程度) 降雨損失：凹地貯留損失を考慮(浸透域 6mm，不浸透域 2mm) ^{※3}
	【地表解析の条件】 解析メッシュサイズ：10mMesh 地盤高：基盤地図情報 5m メッシュから設定 粗度係数：土地利用状況に応じて設定 建物占有率：各メッシュに存在する建物の面積から算出
	【下水放流先河川モデル化の条件】 モデル化方法：厚別川や望月寒川等は合理式で算定 流出係数：計画の流出定数を使用(約 0.70 程度)
降雨条件	対象降雨：令和 3 年 8 月 4 日降雨 10 分観測雨量 令和 3 年 8 月 4 日降雨 1 時間観測雨量

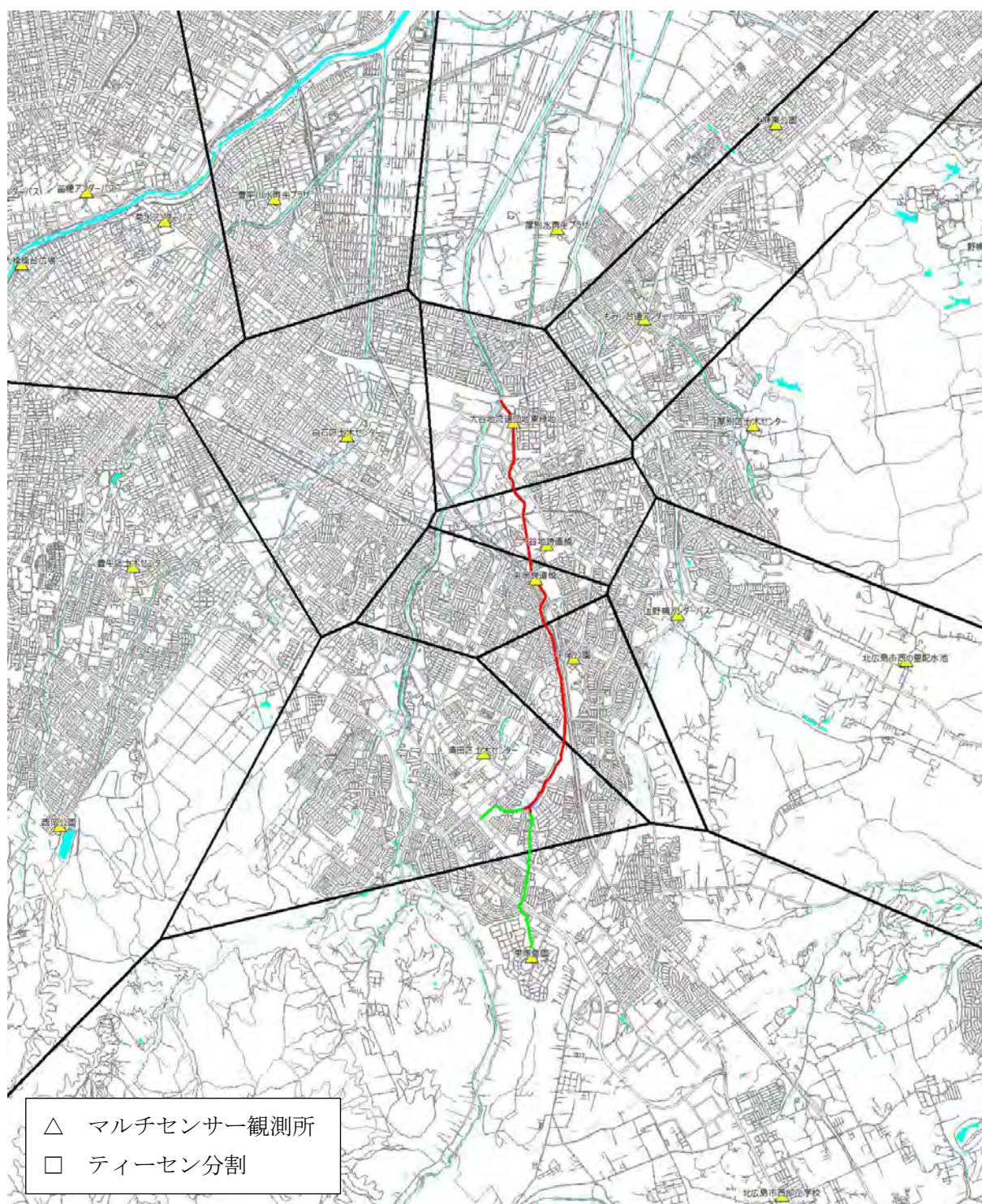


図 2.3.14(1) 令和 3 年 8 月 4 日降雨におけるマルチセンサーを用いたティーセン分割図

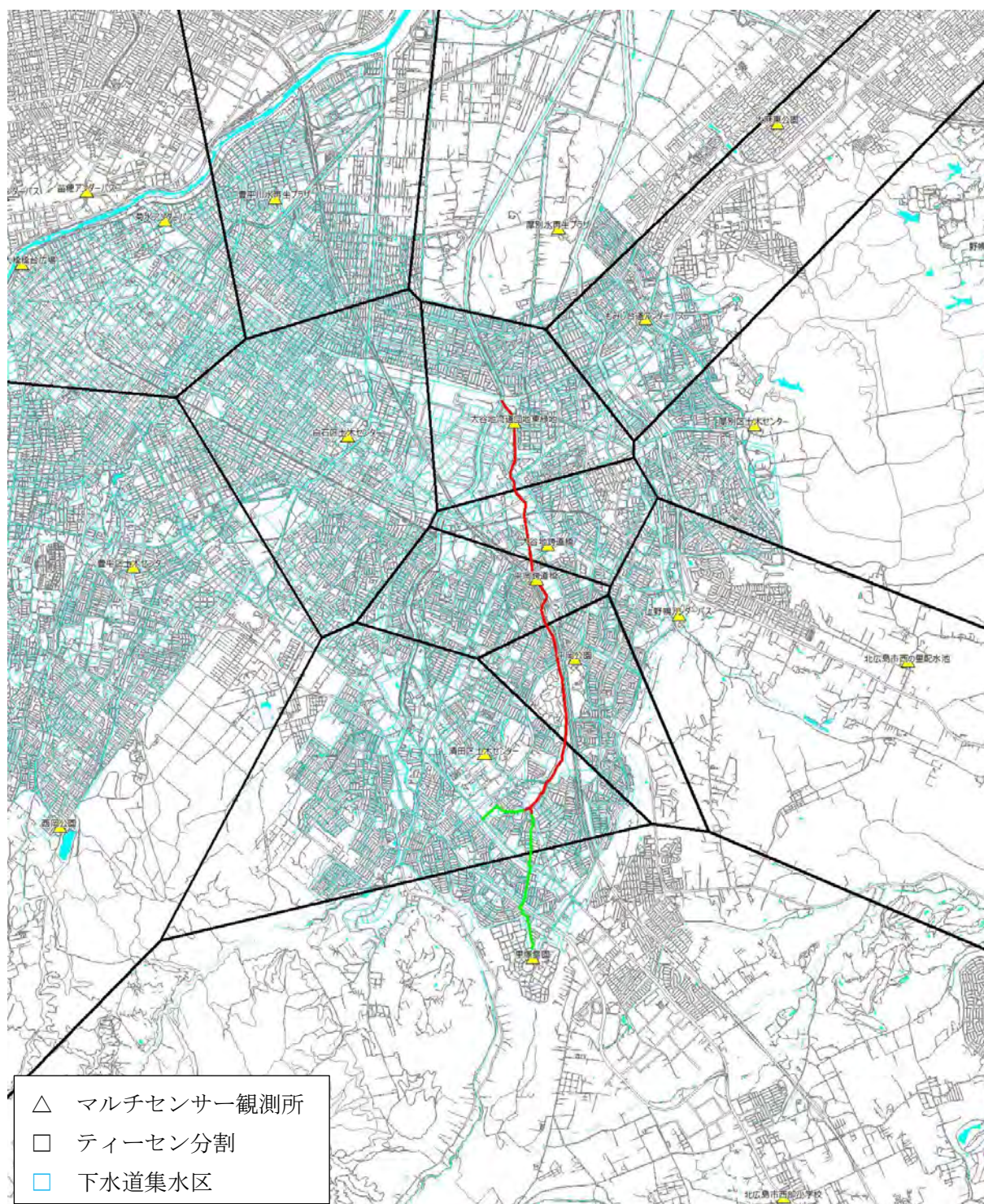


図 2.3.14(2) 令和3年8月4日降雨におけるマルチセンサーを用いたティーセン分割図

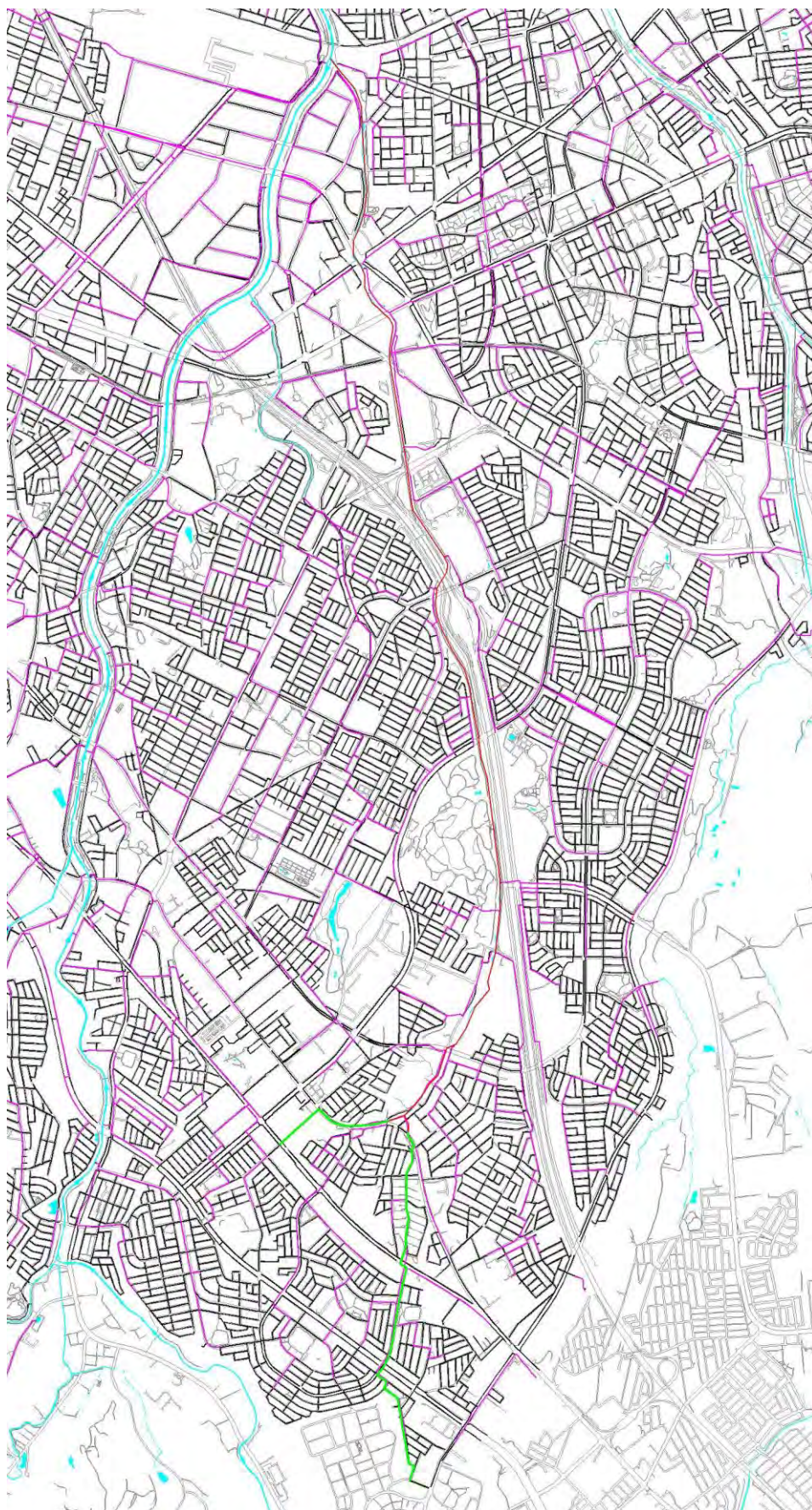


図 2.3.15 モデル化管路

前述の解析条件で令和 3 年 8 月 4 日降雨を対象に検証計算を実施した。検証材料は、図 2.3.19 に示す三里川の上流の 2 箇所の水位観測所と浸水実績の検証を実施した。に水位観測所の検証結果を示す。図 2.3.16 に水位観測所の検証計算結果を示しており、三里川上流地点では、最大水位を高い精度で再現していることが確認できる。一方で、三里川下流地点では、観測水位より計算水位が 1.2m 程度高く算出されている。

図 2.3.17 に三里川の水位縦断面図を示しており、3.2k より上流区間では計算水位が河岸高と同程度となっている。これは、著者が降雨時に現地で確認した河川の状況と一致している。計算水位と三里川下流地点の最大水位を比較すると、三里川下流地点の水位は低くなっている。図 2.3.18 に三里川下流水位観測地点の河川状況を示しており、河道形状が上流区間とは異なる特殊な形状をしている。また、水位観測機の位置も死水域と考えられる箇所に位置するため、観測水位の精度に課題がある可能性が考えられる。

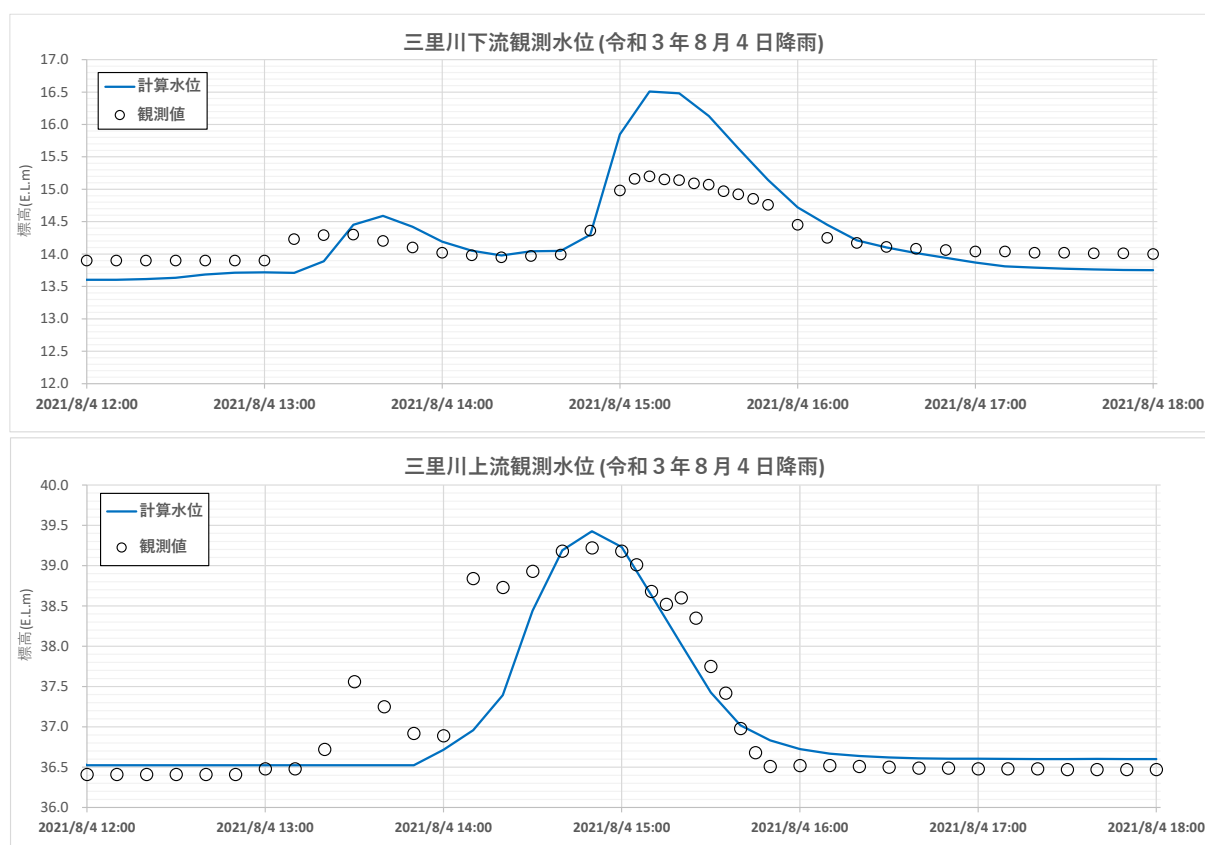


図 2.3.16 水位観測所の検証計算結果

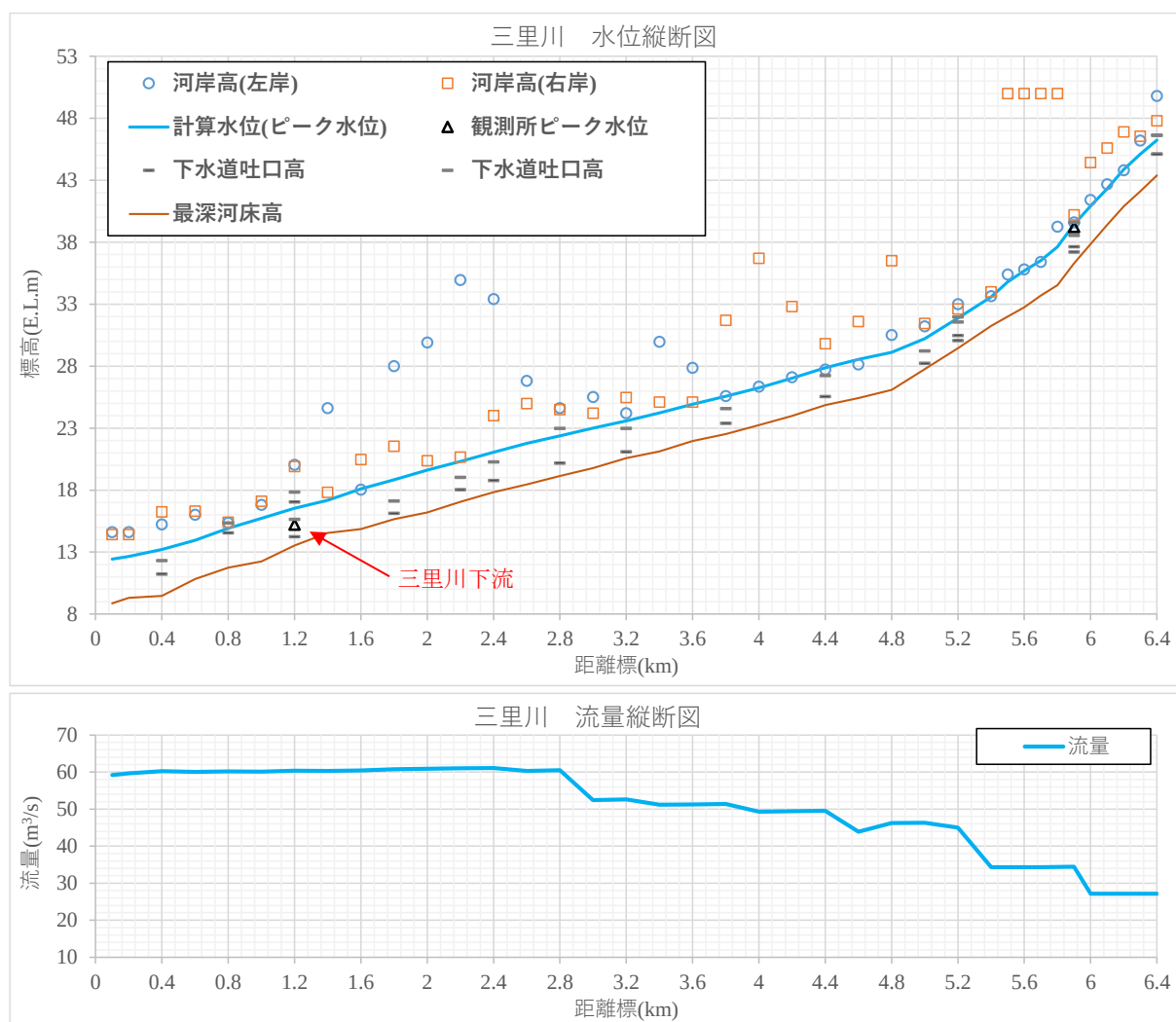


図 2.3.17 令和3年8月4日降雨時の三里川のピーク水位縦断図



図 2.3.18(1) 三里川下流水位観測所地点（令和4年2月20日撮影）

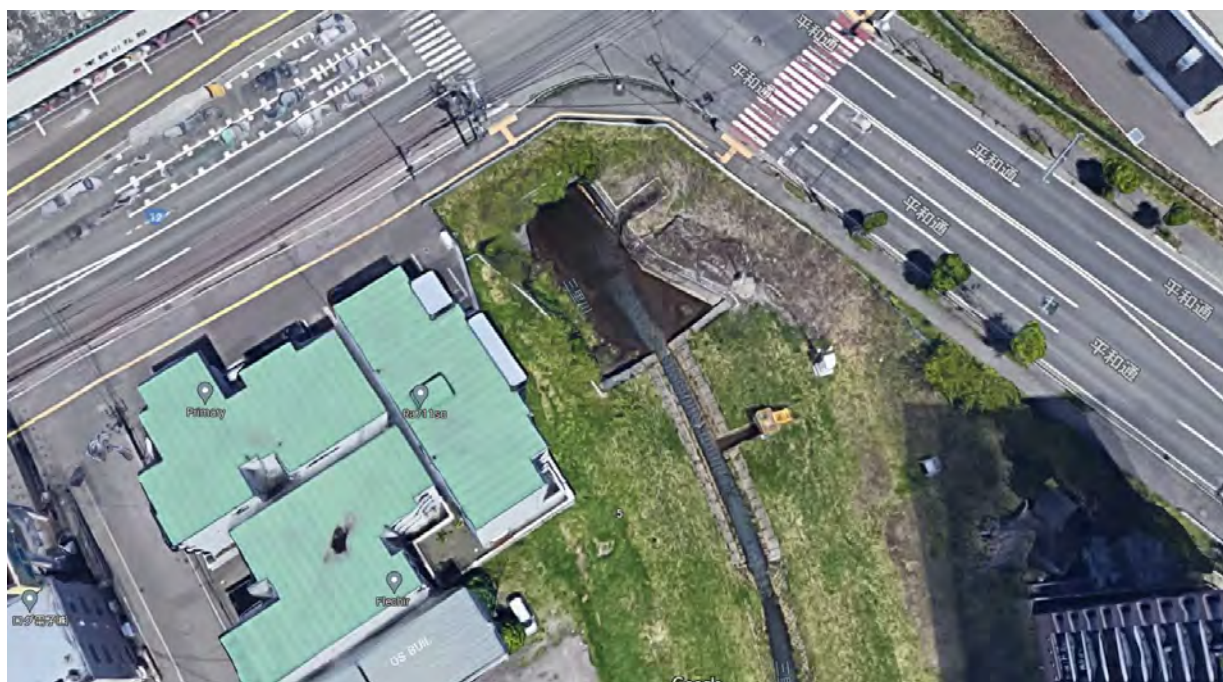


図 2.3.18(2) 三里川下流水位観測所地点（Google アースから引用）

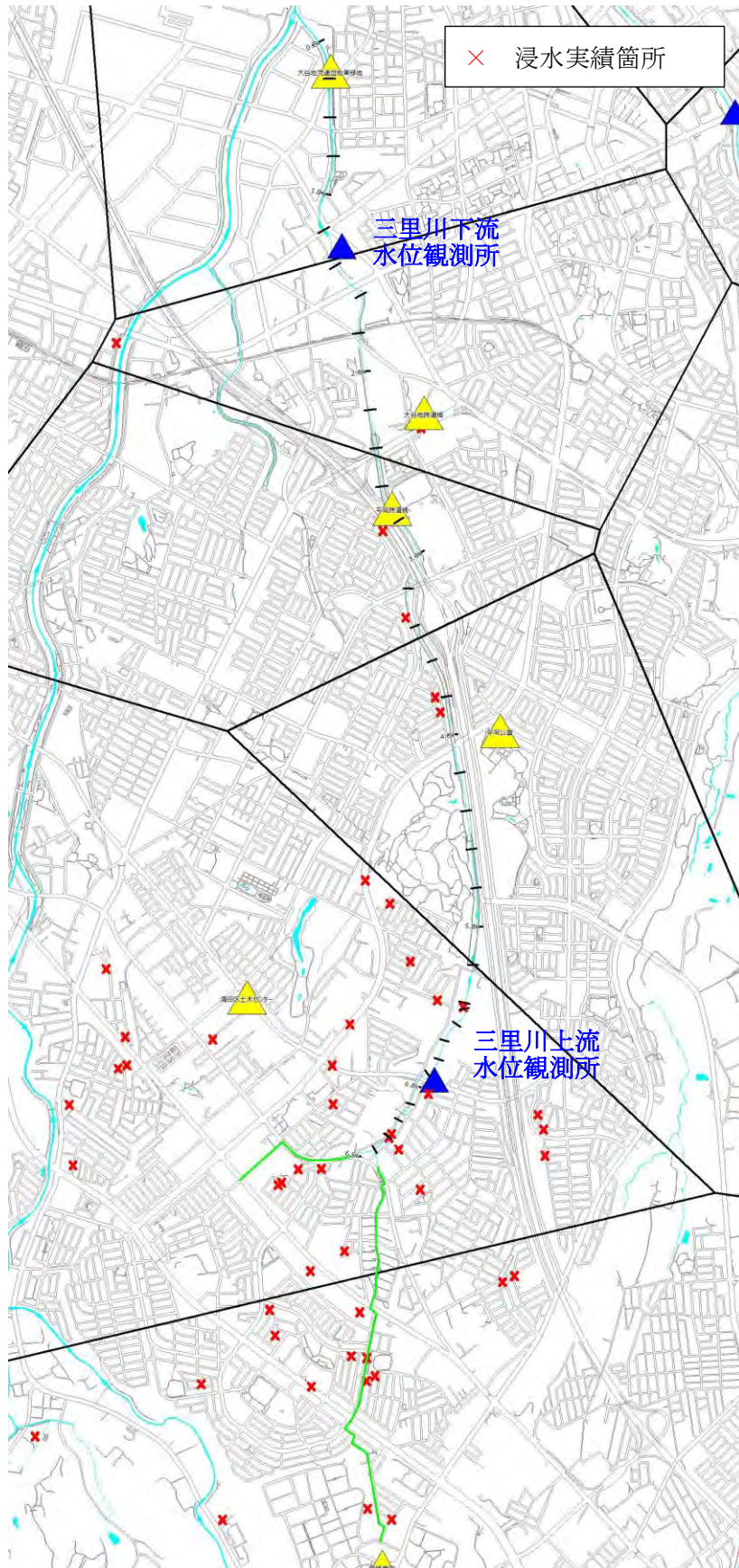


図 2.3.19 三里川水位観測所と浸水実績の位置図

三里川上流地点では、観測水位のピーク水位は精度良く再現しているが初期の水位上昇や立ち上がりの部の再現性が十分でないことが課題である。検証計算に使用したマルチセンサーの観測値と計算水位の比較図を図 2.3.20 に示しており、計算水位は水位観測所上流に位置する里塚霊園や清田区土木センターの降雨波形に応答していることが明らかである。そのため、4 日 13:30 頃の水位上昇を再現するには、降雨観測値の見直しを行うことが必要であると考えられる。このことは、内水氾濫のような局所的な氾濫や水位上昇には、その地点で生じた降雨を条件として正しく与えることが重要であることを示している。

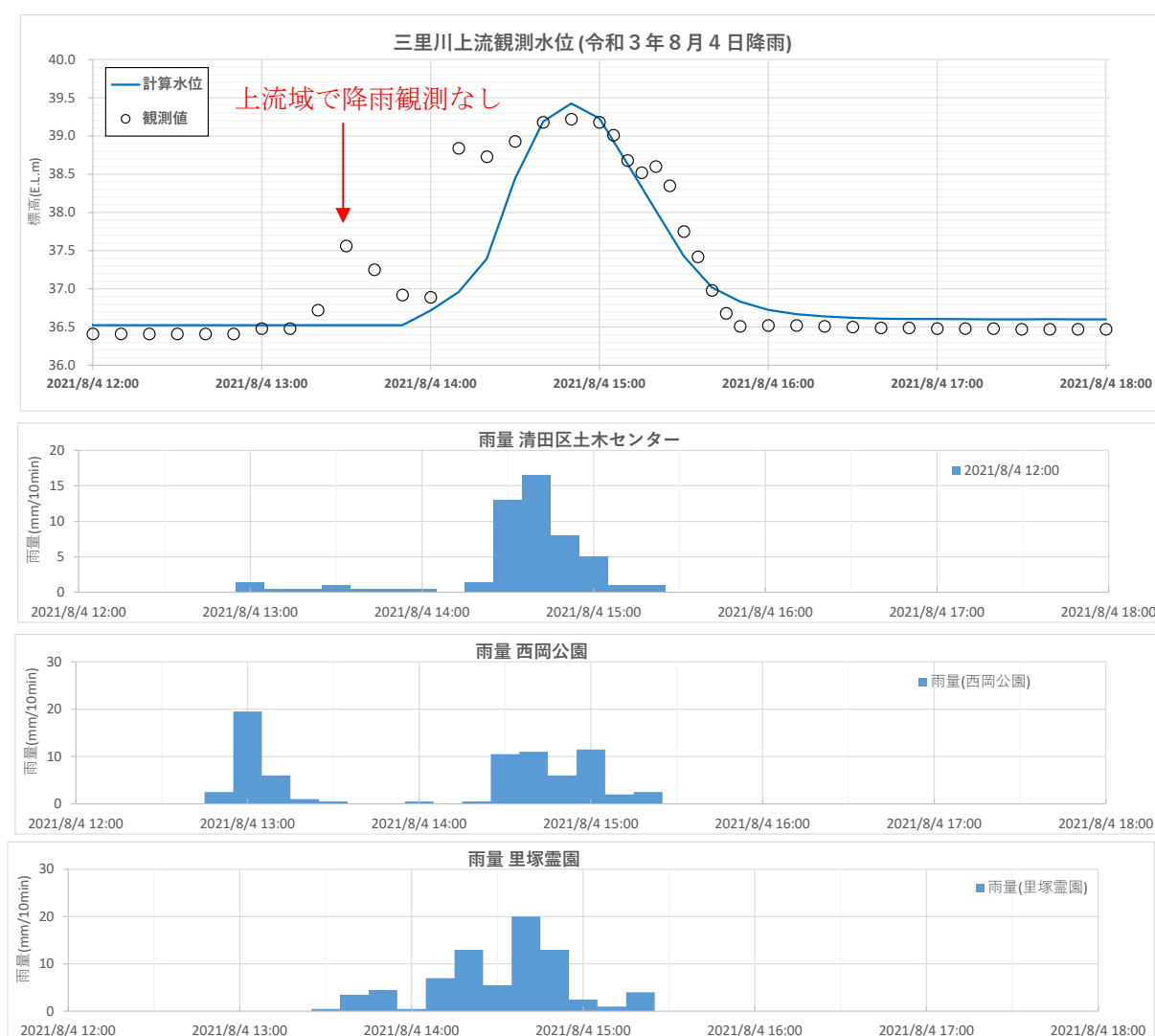


図 2.3.20 三里川上流地点の検証結果とマルチセンサーの観測雨量の比較

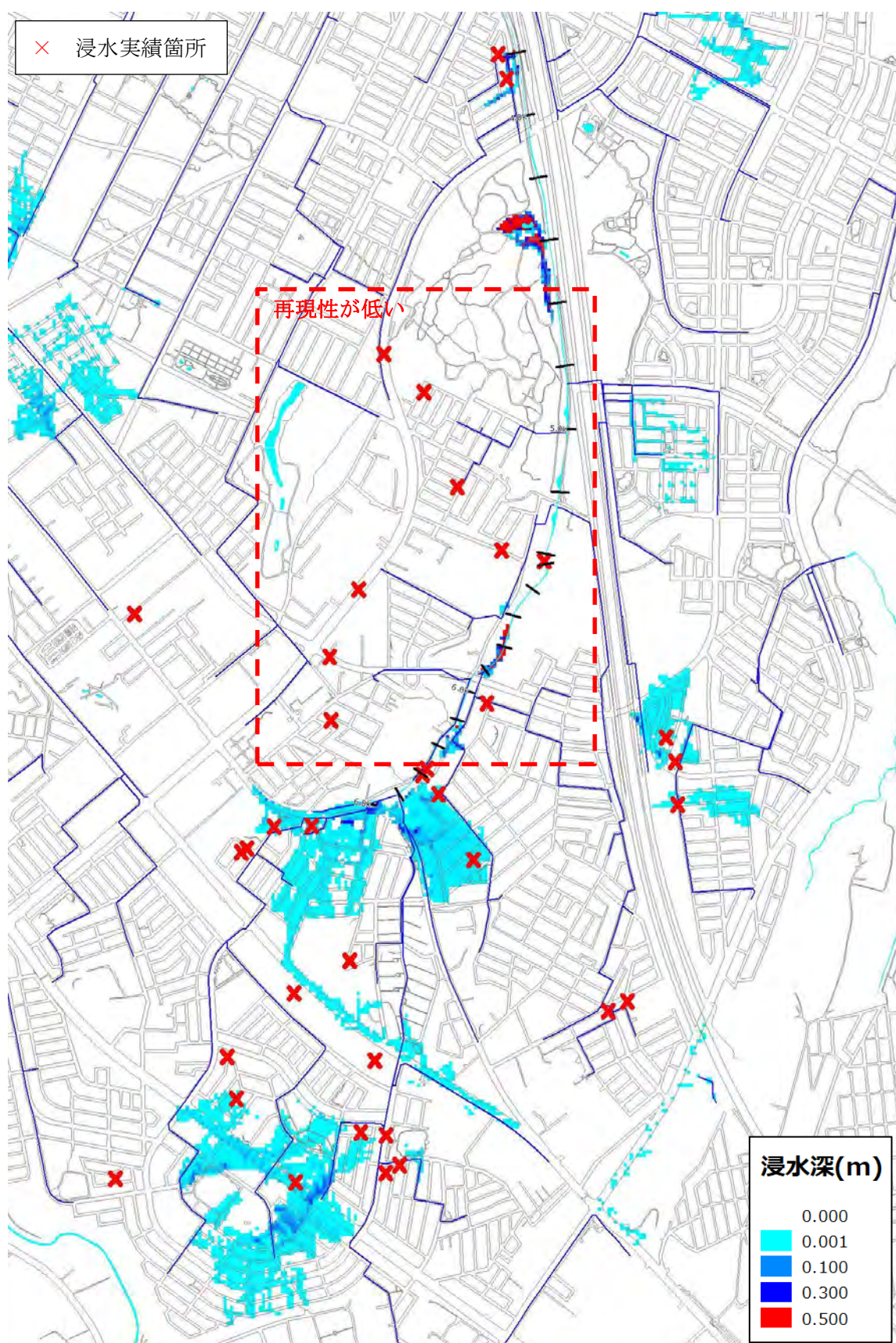


図 2.3.21 浸水実績の検証結果

(5) 降雨の時間解像度による計算結果への影響

本検討では、降雨外力の時間解像度を 10 分雨量と 1 時間雨量の 2 種類で計算を実施した。図 2.3.22 に降雨外力と三里川の水位観測所の計算水位の比較結果を示す。三里川上流地点の水位波形は、時間雨量を使用したケースの方が概ねの波形を再現している。ただし、最大水位の再現性は、10 分雨量を使用したケースの精度が高い。浸水実績の再現性を比較すると、図 2.3.23 に示すように時間雨量では下水道の溢水による浸水が殆ど発生していないことが分かる。このことから、浸水被害を適切に評価するには 1 時間雨量より細かい時間スケールでの降雨波形の設定が重要であることが分かる。

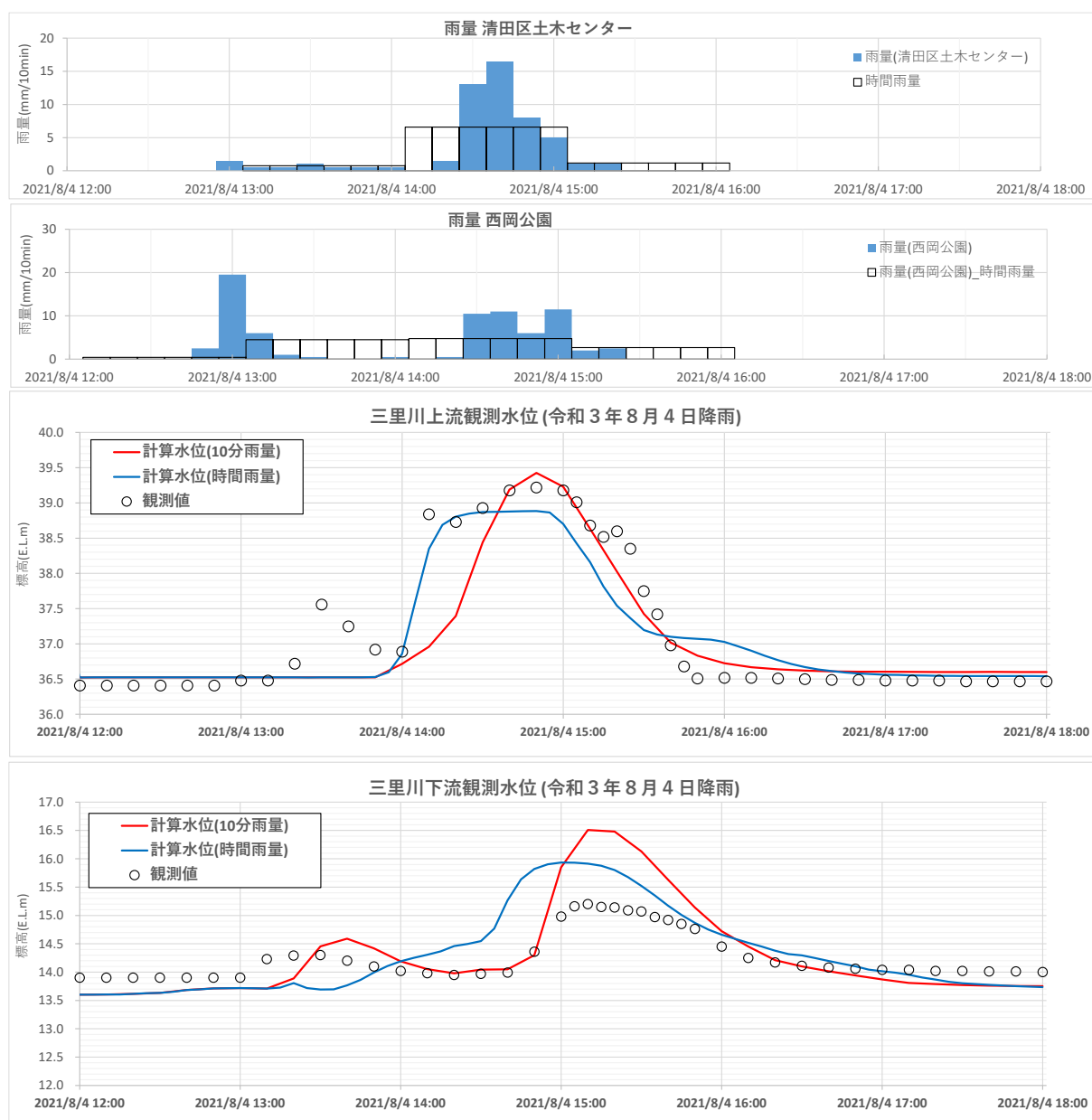


図 2.3.22 10 分雨量と時間雨量の時間解像度と河川水位の応答関係

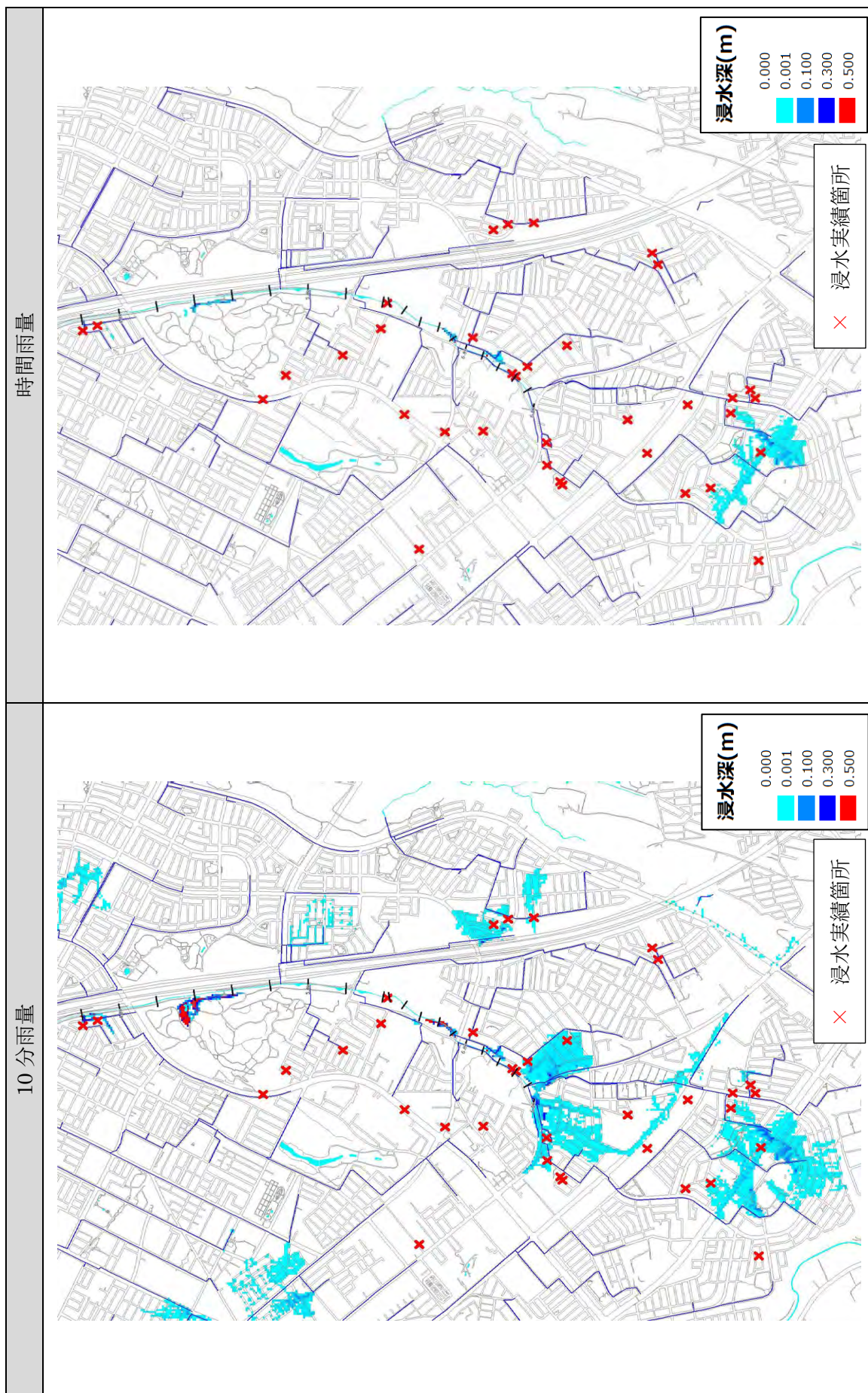


図 2.3.23 浸水実績の再現性の比較

2.3.2 氾濫発生要因に着目した内外水同時解析モデルの検証

令和3年8月4日降雨を対象とした検証計算では、図 2.3.24 に示すように西岡公園周辺の浸水実績のある箇所が氾濫解析で浸水が発生しなかった。本検討では、西岡公園周辺を対象に内外水同時解析モデルの精度向上を目的に検証計算を実施した。

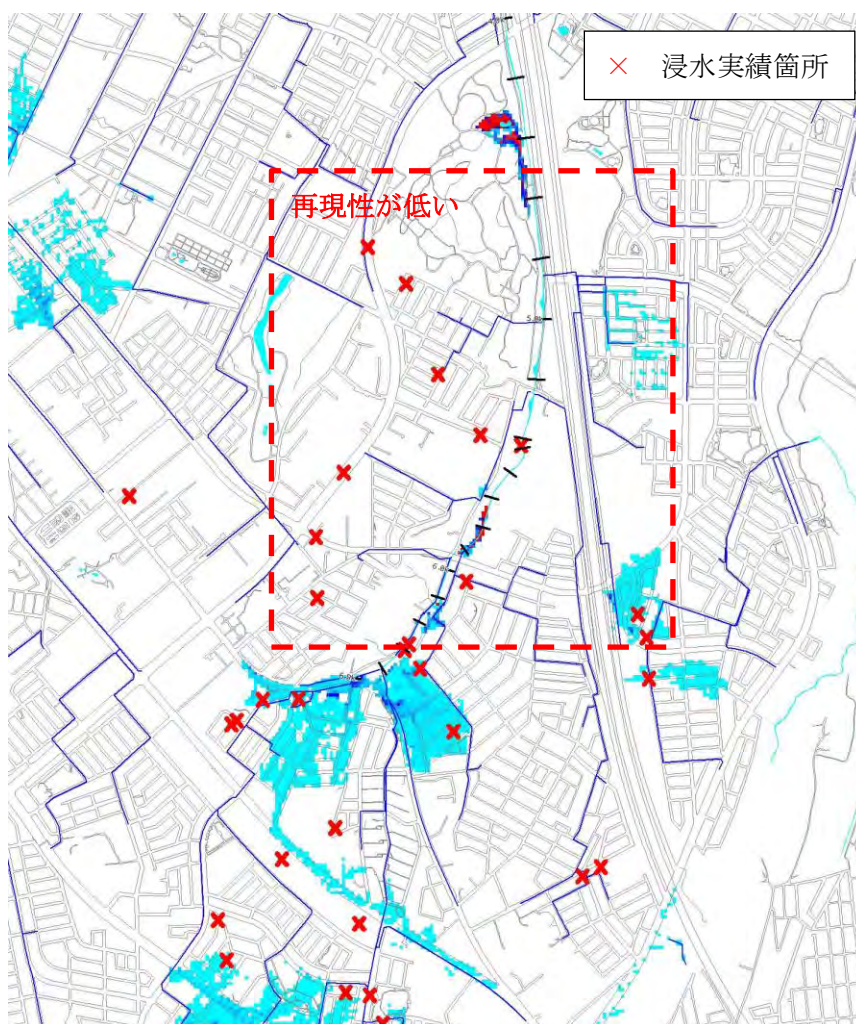


図 2.3.24 令和3年8月4日の検証で氾濫解析結果

(1) 内外水同時解析モデルのパラメータ及び境界条件の整理

内外水同時解析を実施するには、河川および下水道の水位計算モデル(一次元不定流モデル)、地表面の氾濫解析モデル(平面二次元氾濫計算モデル)の各種パラメータや境界条件を設定する必要がある。表 2.3.4 に内外水同時解析モデルに使用する各種パラメータや境界条件の一覧を整理した。

表 2.3.4 内外水同時解析モデルの境界条件とパラメーター一覧

分類	項目	内水解析	外水解析	備考
外 力	境界条件(時間解像度)	10 分雨量	10 分～時間雨量	
	境界条件(空間解像度)	雨量観測所～レーダー雨量	雨量観測所～レーダー雨量	
	パラメータ	窪地損失・流出率	流出率等	
水 位 計 算	境界条件	管路諸元(管径・勾配等)	河道諸元(川幅・勾配等)	
	境界条件(流量条件)	流出計算(修正 RRL 法等)	流出計算(合成合理式等)	下水道や河川の流域分割
	パラメータ	粗度係数	粗度係数	
	モデル化解像度	モデル化管路の管径	モデル化断面間隔	
	境界条件(下流端)	河川水位	潮位・合流河川水位	
氾 濫 解 析	メッシュ解像度	5m～10m	10m～25m	地盤高・建物占有率等に影響
	パラメータ	粗度係数	粗度係数	
	溢水・氾濫条件	人孔高	堤防高(破堤水位)	地盤高データに依存
	氾濫量の算出	越流公式 (管路水位と氾濫原の水位差)	越流公式 (河道水位と氾濫原の水位差)	定数の設定あり
	空間スケール	マンホールや雨水枡 (点在)	河川延長 (一連構造物)	

(2) 西岡公園地区を対象とした詳細モデルの構築

前述の各種境界条件とパラメータと氾濫形態への影響を、2つの解像度のモデルを構築することで比較を実施した。5m メッシュの詳細なモデルを構築したが、10m メッシュモデルとの再現性の差は僅かとなった。

表 2.3.5 解析モデルの条件一覧

項目	5m メッシュモデル	10m メッシュモデル
解析領域	1km×1km	1km×1km
メッシュサイズ	5m×5m メッシュ	10m×10m メッシュ
モデル化管路	全管路 4,943m (管径 600m 以上の管路延長 766m (約 15%))	
粗度係数	地表メッシュ : 0.02 下水道管路 : 0.013	
降雨外力	清田区土木センター 10 分雨量	
流出率	下水道流出計算の流出率 : 0.85	
下流端	三里川 5.2k 計算水位	
下水道集水区	下水道の処理集水区データ	
河川流量	全体モデルの計算流量を三里川上流端に設定	
溢水条件	人孔箇所の 5m 地盤高	人孔箇所の 10m 地盤高

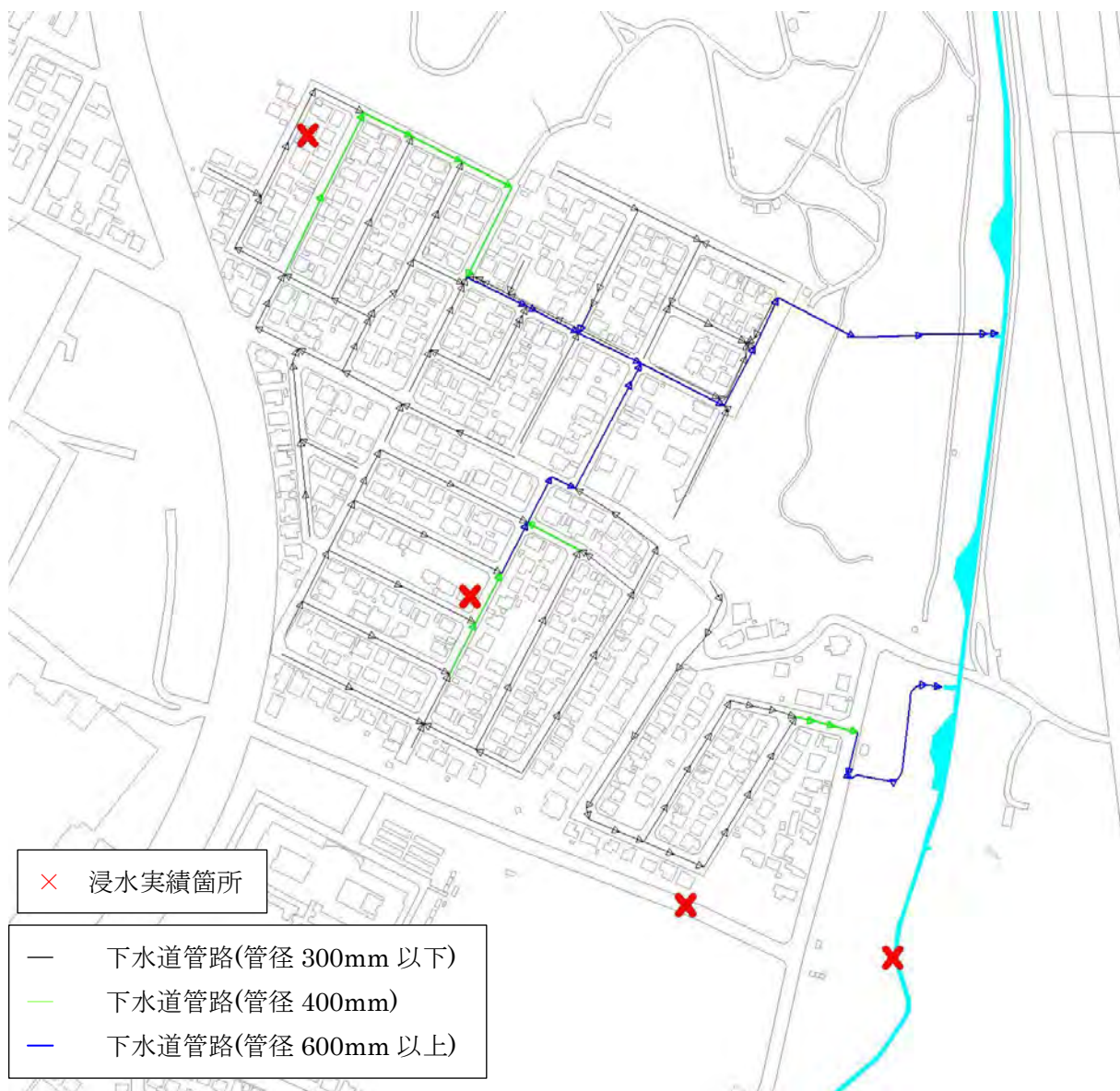


図 2.3.25 西岡公園周辺の管路網の整備状況



図 2.3.26 西岡公園周辺の管路網の整備状況(集水区)

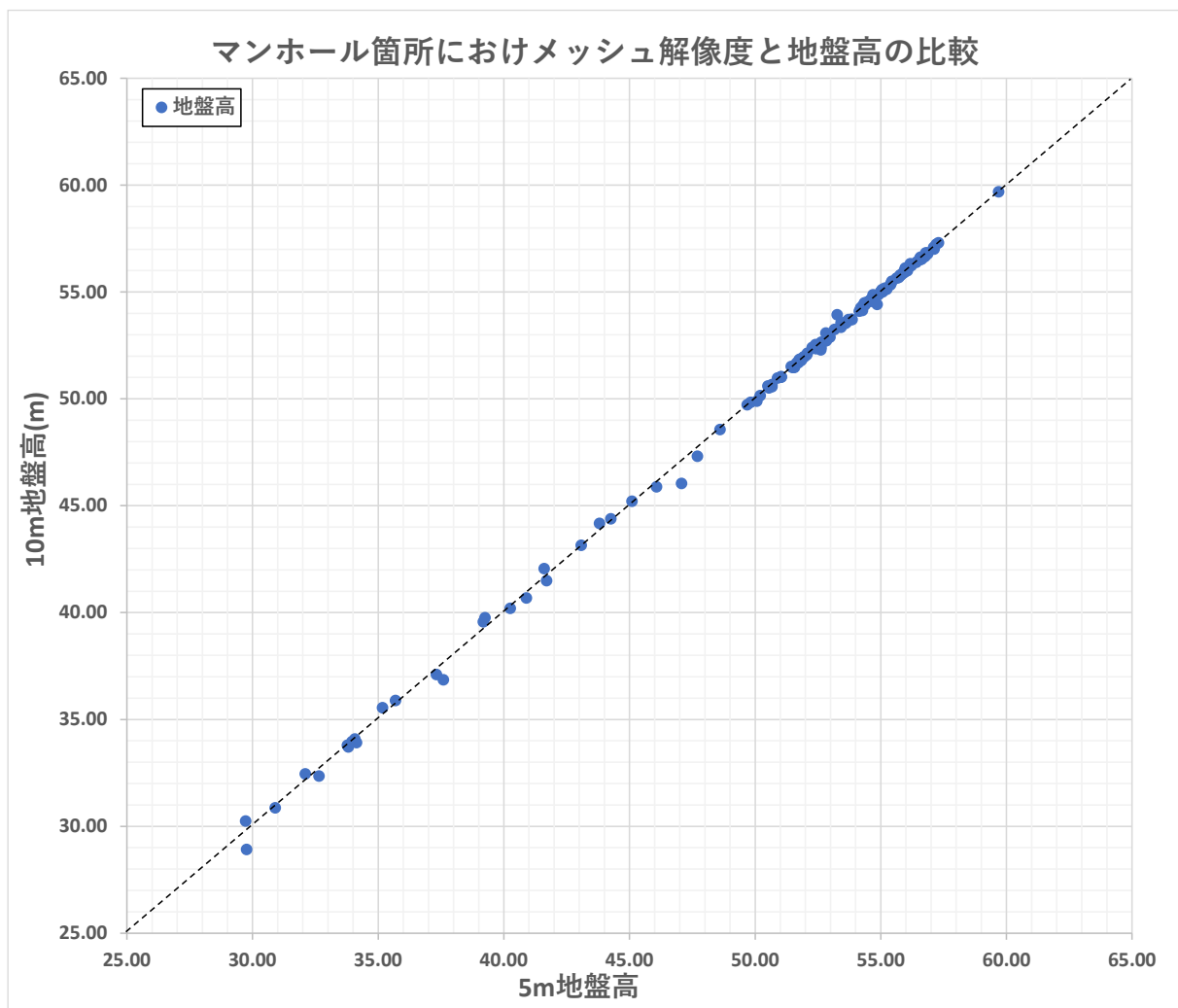


図 2.3.27 メッシュ解像度によるマンホール箇所の地盤高の違い

表 2.3.6 マンホール箇所の地盤高データの解像度による差分値

項目	差分(m)
5m地盤高と10m地盤高の差分の平均値	-0.02
5m地盤高と10m地盤高の差分の最大値	0.66
5m地盤高と10m地盤高の差分の最小値	-1.04

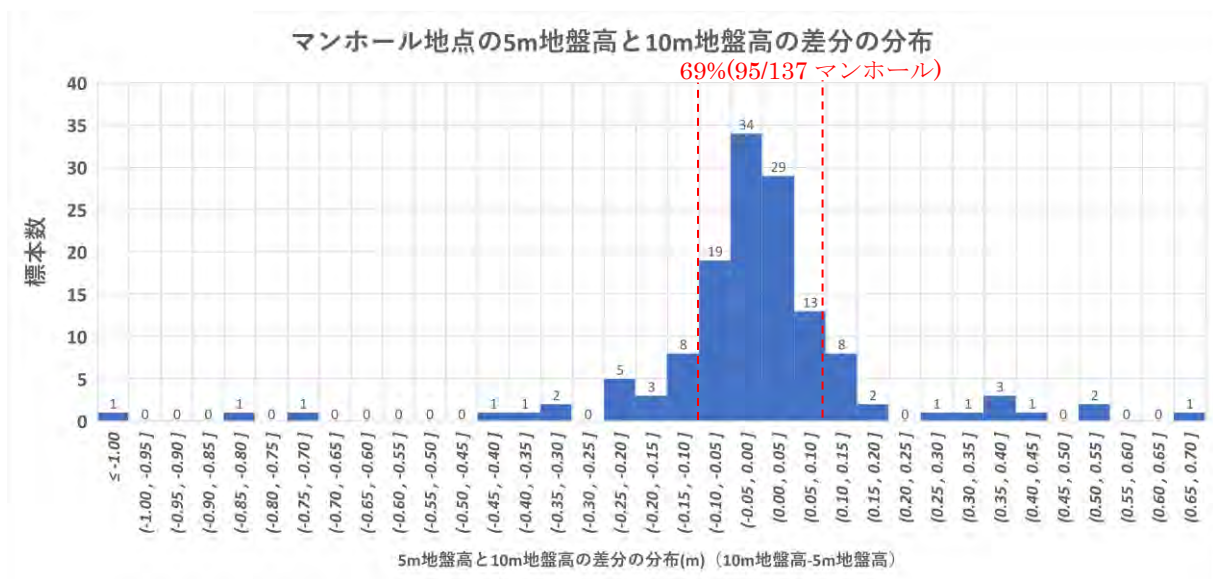


図 2.3.28 マンホール地点の 5m 地盤高と 10m 地盤高の差分の分布

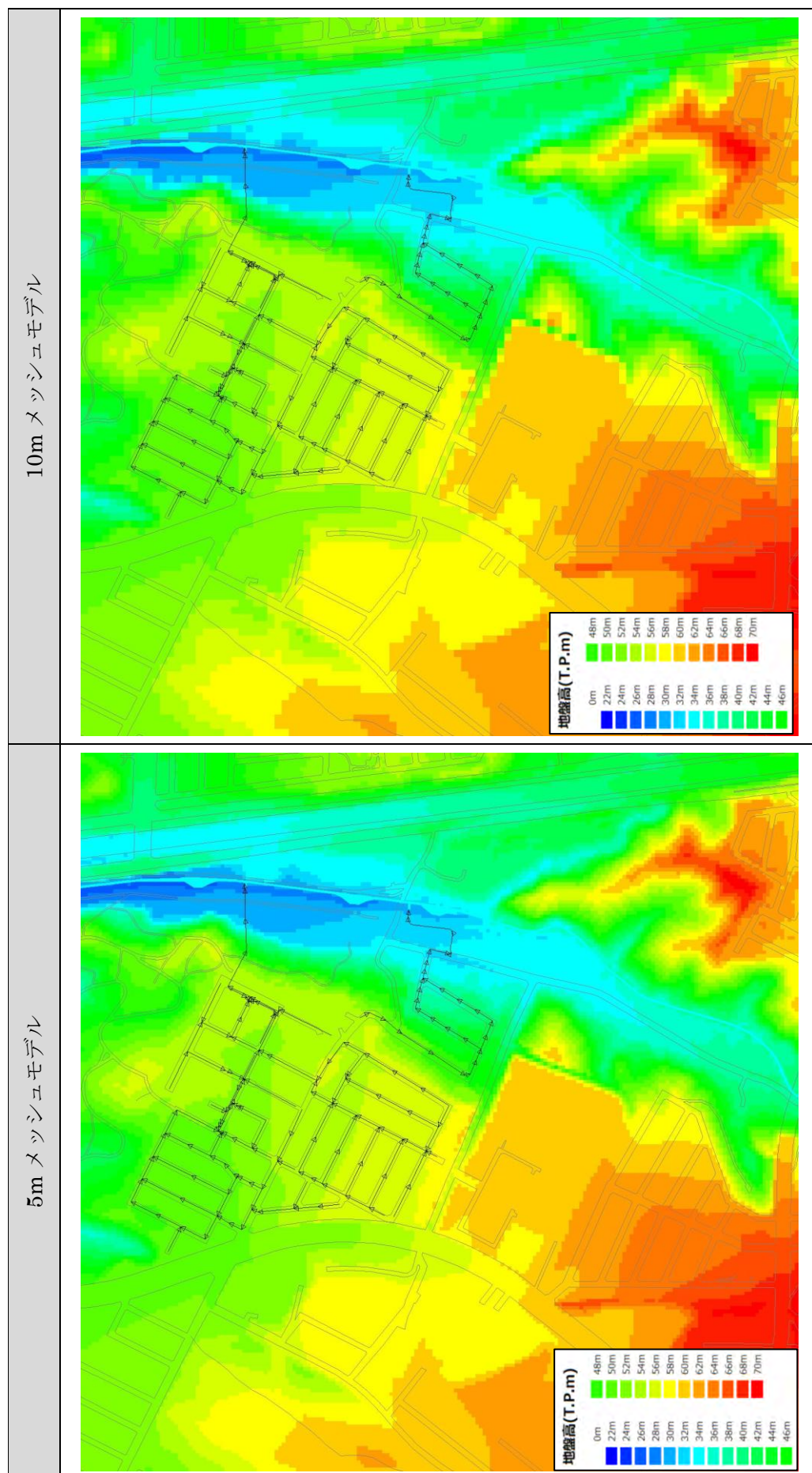


図 2.3.29 5m メッシュモデルと 10m メッシュモデルの地盤高データの解像度の比較

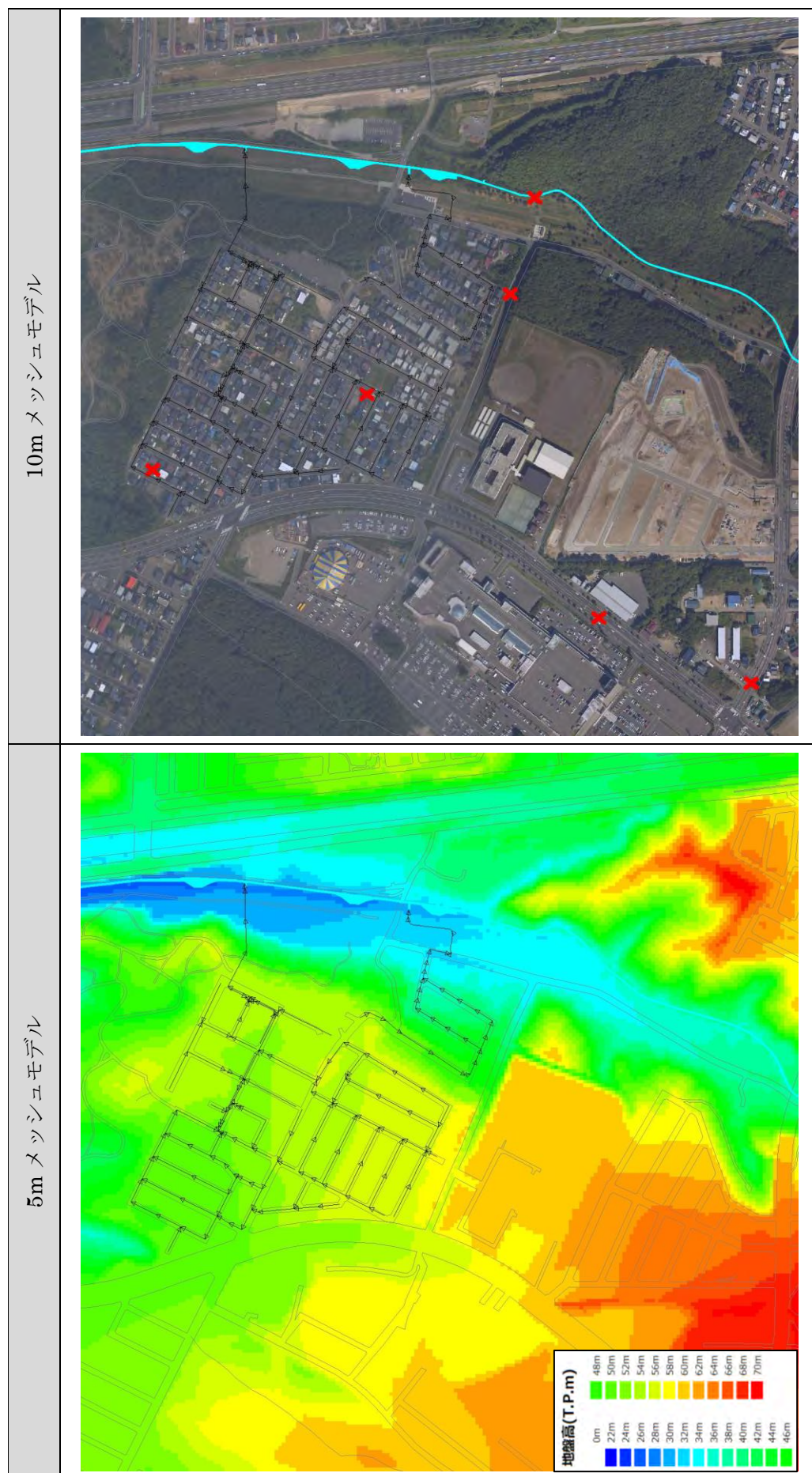


図 2.3.30 5m メッシュ地盤高と土地利用状況の比較

10m メッシュモデル



5m メッシュモデル

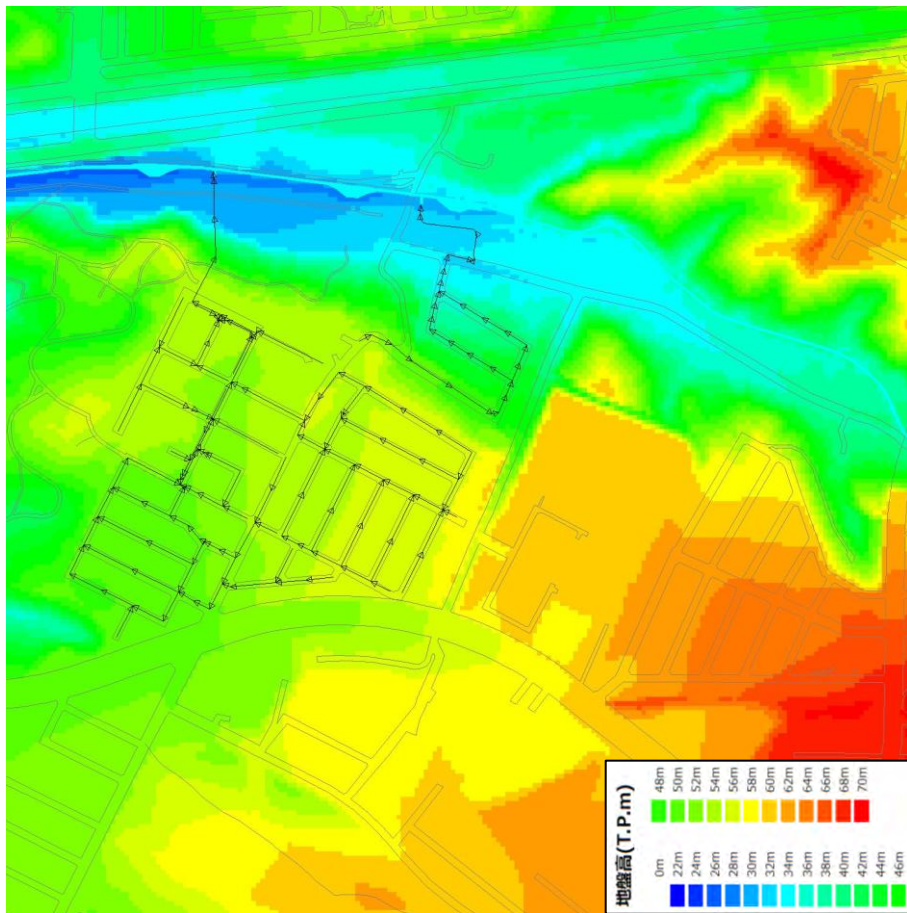




図 2.3.31 浸水解析結果の比較

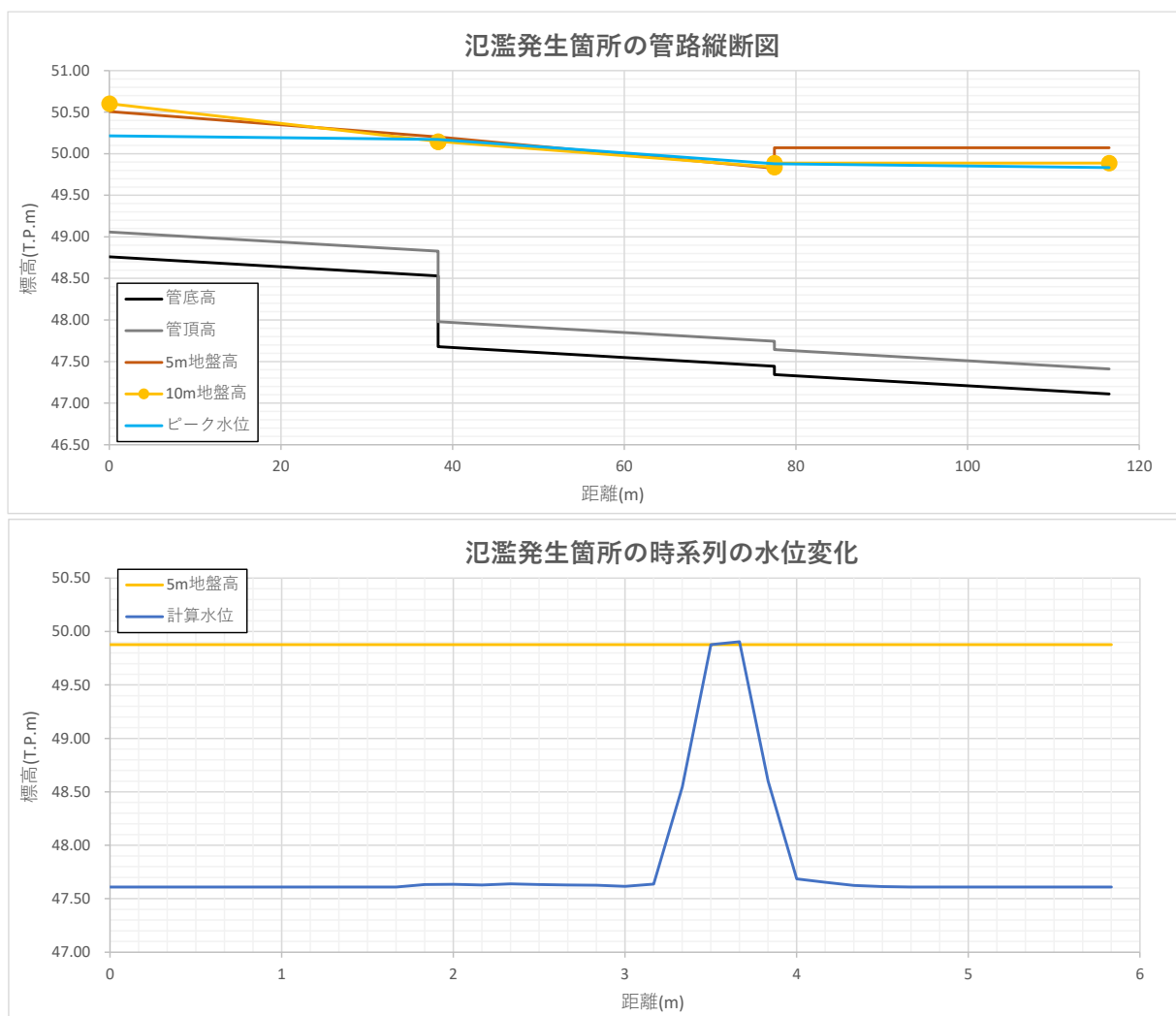


図 2.3.32 局所的な浸水発生箇所の状況

2.3.3 浸水実績が生じた洪水に対する検証計算結果

表 2.3.7 に検証計算の条件を示す。流出計算で算定した各河川の上流端に与える流量を示す。

表 2.3.7 計算条件一覧

項目	設定条件
解析条件	【河川モデル化の条件】 モデル化方法：厚別川や望月寒川等は合理式で算定(豊平川は、貯留関数法) 流出係数：計画の流出定数を使用
	【下水道網のモデル化条件】 対象管路：管路 600mm 以上の管路 (北郷地区の一部は、600mm 以下の管路もモデル化) 対象人孔：管路 600mm 以上の管路に接続される人孔 (北郷地区の一部は、600mm 以下の人孔もモデル化) 整備時点：令和元年度 集水区：管径 600mm 以上の管路網に応じて設定
	【下水道流出解析の条件】 流出率：キャリブレーションで同定 流入時間：下水道基本計画値を設定 降雨損失：凹地貯留損失を考慮(浸透域 6mm, 不浸透域 2mm) (降雨損失は、流出解析モデル利活用マニュアルの一般値を使用)
	【地表解析の条件】 解析メッシュサイズ：10m×10m メッシュ 地盤高：基盤地図情報 5m×5m メッシュから設定 粗度係数：土地利用状況に応じて設定 建物占有率：基盤地図情報の建物外周線から設定
	【下水処理施設等の条件】 モデル化方法：下水処理施設接続管路の下流端にゲートを設定(常用時の開度を設定) 放流量：許可放流量を上限に流入流を放流 雨水貯留施設：各施設の貯水容量分を貯留
降雨条件	対象降雨：2020 年 8 月 29 日降雨 解析期間：2020 年 8 月 29 日 12:00 から 31 日 11:00(48 時間)(図 2.3.33 参照) 降雨の設定方法：観測値のあるマルチセンサ雨量観測所を用いてティーセン分割を実施して各流域に与える雨量を設定(図 2.3.34 参照)

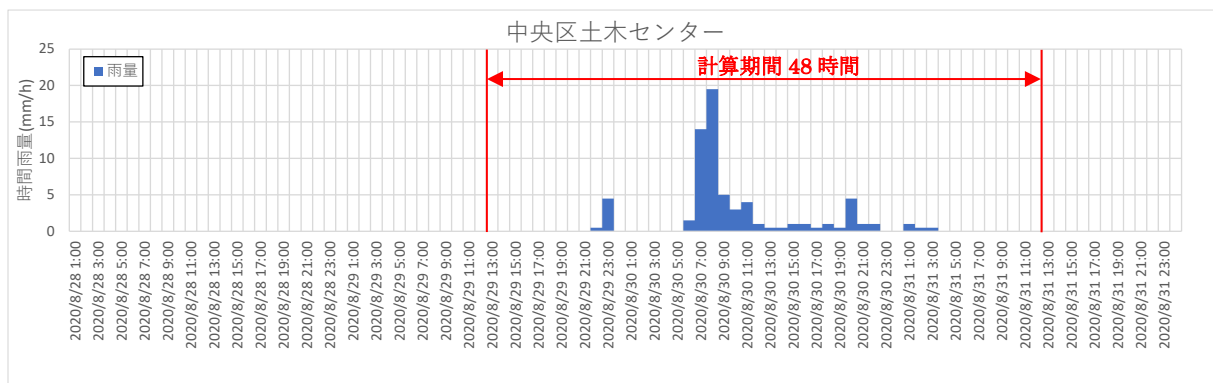


図 2.3.33 検証計算期間

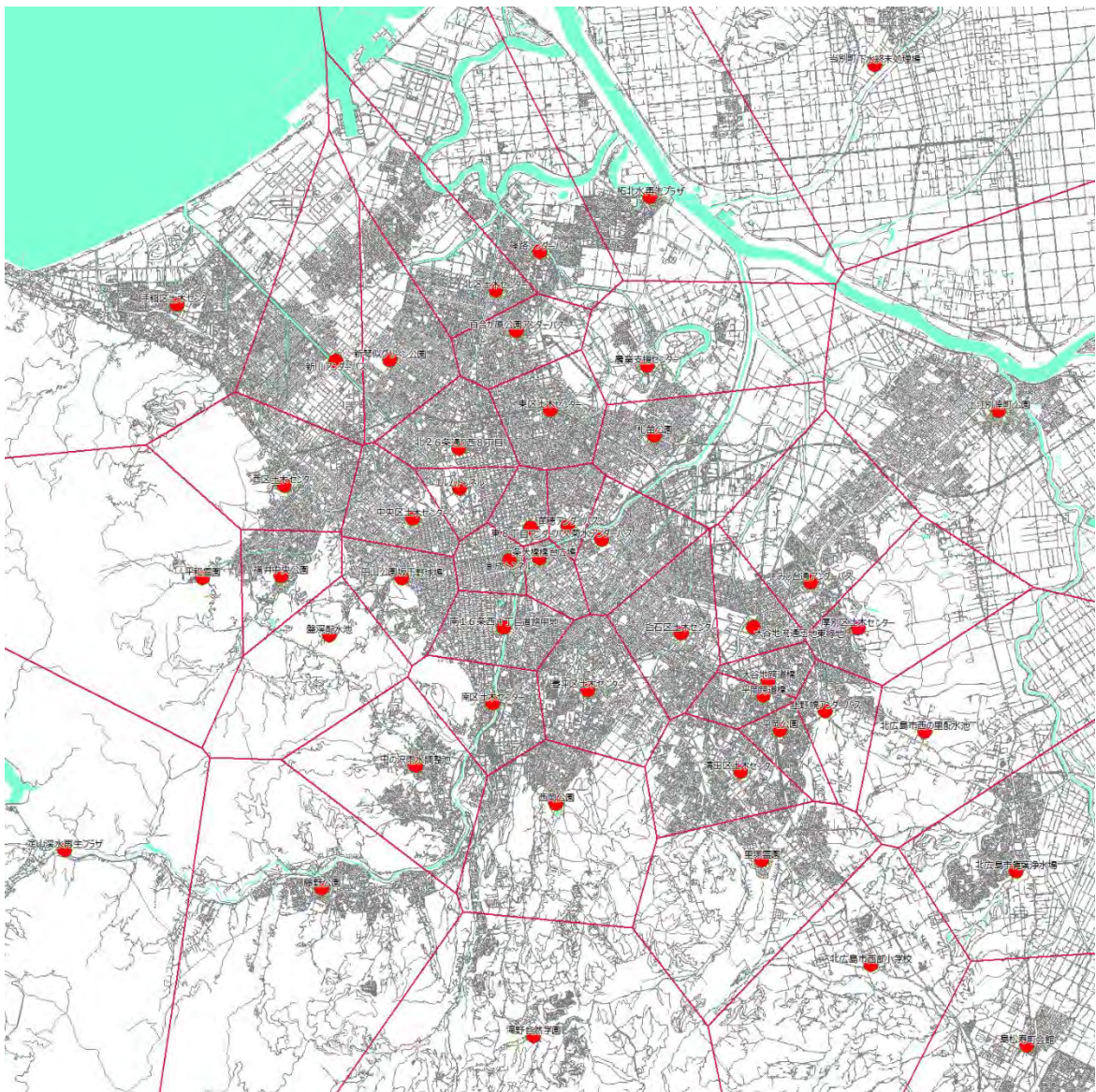
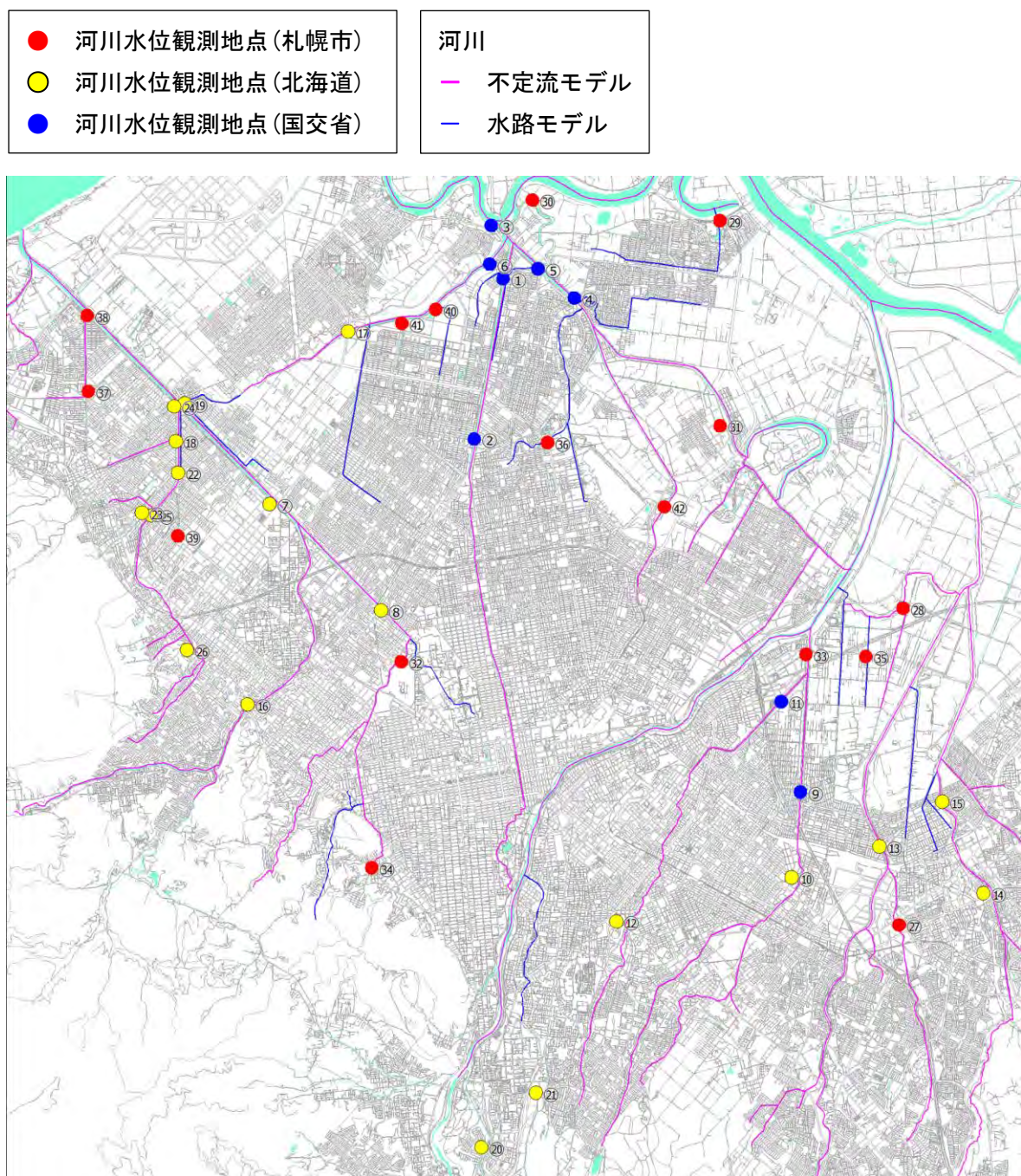


図 2.3.34 ティーセン分割図

本検討では、対象期間の河川水位の変動状況を検証した。対象とした河川の水位観測地点を表 2.3.8 及び図 2.3.35 に示す。河川水位については、概ね観測値を計算値が再現していることを確認した。

表 2.3.8 対象水位観測所一覧

No.	水位観測所名	水系名	河川名	管理者	位置(km)	水位標の ゼロ点高(m)
①	創成	石狩川	創成川	国交省 札幌開発建設部	0.70	0.0
②	創成上流	石狩川	創成川	国交省 札幌開発建設部	-	0.0
③	茨戸	石狩川	茨戸川	国交省 札幌開発建設部	11.30	0.0
④	伏龍下流	石狩川	伏龍川	国交省 札幌開発建設部	2.40	0.0
⑤	福移橋	石狩川	伏龍川	国交省 札幌開発建設部	-	0.0
⑥	発寒	石狩川	発寒川	国交省 札幌開発建設部	0.80	0.0
⑦	天狗橋	新川	新川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	8.00	0.0
⑧	琴似川	新川	琴似川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	2.50	0.0
⑨	月寒	石狩川	月寒川	国交省 札幌開発建設部	3.50	0.0
⑩	月寒川	石狩川	月寒川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	5.40	0.0
⑪	望月寒	石狩川	望月寒川	国交省 札幌開発建設部	左岸 0.87	0.0
⑫	望月寒川	石狩川	望月寒川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	7.80	0.0
⑬	川下橋	石狩川	厚別川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	10.50	0.0
⑭	南郷もみじ橋	石狩川	野津幌川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	7.00	0.0
⑮	厚別西川	石狩川	野津幌川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	4.20	0.0
⑯	西野（琴似発寒川）	新川	琴似発寒川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	4.60	0.0
⑰	発寒川	石狩川	発寒川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	4.00	0.0
⑱	わらび川	新川	中の川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	0.60	0.0
⑲	発寒古川	新川	発寒古川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	5.20	0.0
⑳	真駒内橋（真駒内川）	石狩川	真駒内川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	2.00	0.0
㉑	精進川	石狩川	精進川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	5.00	0.0
㉒	共栄橋（中の川）	新川	中の川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	1.50	0.0
㉓	富丘川	新川	中の川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	-	0.0
㉔	旧軽川	新川	旧軽川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	5.10	0.0
㉕	西宮の沢	新川	中の川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	-	0.0
㉖	中の川一条橋	新川	中の川	北海道道央 空知総合振興局札幌建管	6.00	0.0
㉗	三里川	石狩川	三里川	札幌市建設局土木部河川課	1.34	15.0
㉘	6線幹道排水	石狩川	6線幹道排水	札幌市建設局土木部河川課	0.08	6.0
㉙	拓北川	石狩川	拓北川	札幌市建設局土木部河川課	0.29	3.0
㉚	篠路川	石狩川	篠路川	札幌市建設局土木部河川課	0.40	3.0
㉛	雁来新川	石狩川	雁来新川	札幌市建設局土木部河川課	4.20	5.0
㉜	琴似川下流	石狩川	琴似川	札幌市建設局土木部河川課	0.65	10.0
㉝	米里	石狩川	米里幹道排水	札幌市建設局土木部河川課	0.07	6.0
㉞	界川	新川	界川	札幌市建設局土木部河川課	3.42	70.0
㉟	7線幹道排水	石狩川	7線幹道排水	札幌市建設局土木部河川課	0.87	6.0
㊱	烈々布排水	石狩川	烈々布排水	札幌市建設局土木部河川課	0.03	5.0
㊲	手稲土功川上流	新川	手稲土功川上流	札幌市建設局土木部河川課	1.70	6.0
㊳	手稲土功川下流	新川	手稲土功川下流	札幌市建設局土木部河川課	0.10	6.0
㊴	追分川	石狩川	追分川	札幌市建設局土木部河川課	0.02	6.0
㊵	東屯田川	石狩川	東屯田川	札幌市建設局土木部河川課	0.10	1.8
㊶	屯田川	石狩川	屯田川	札幌市建設局土木部河川課	0.13	1.8
㊷	伏龍川	石狩川	伏龍川	札幌市建設局土木部河川課	8.00	6.0



※札幌市の水位観測所位置は、平成 30 年度の施設台帳記載の緯度経度を使用
 ※国土交通省は、水文水質データベースの移動経度を使用
 ※北海道の観測所は、川の防災情報の住所から位置を設定

図 2.3.35 対象水位観測所位置図

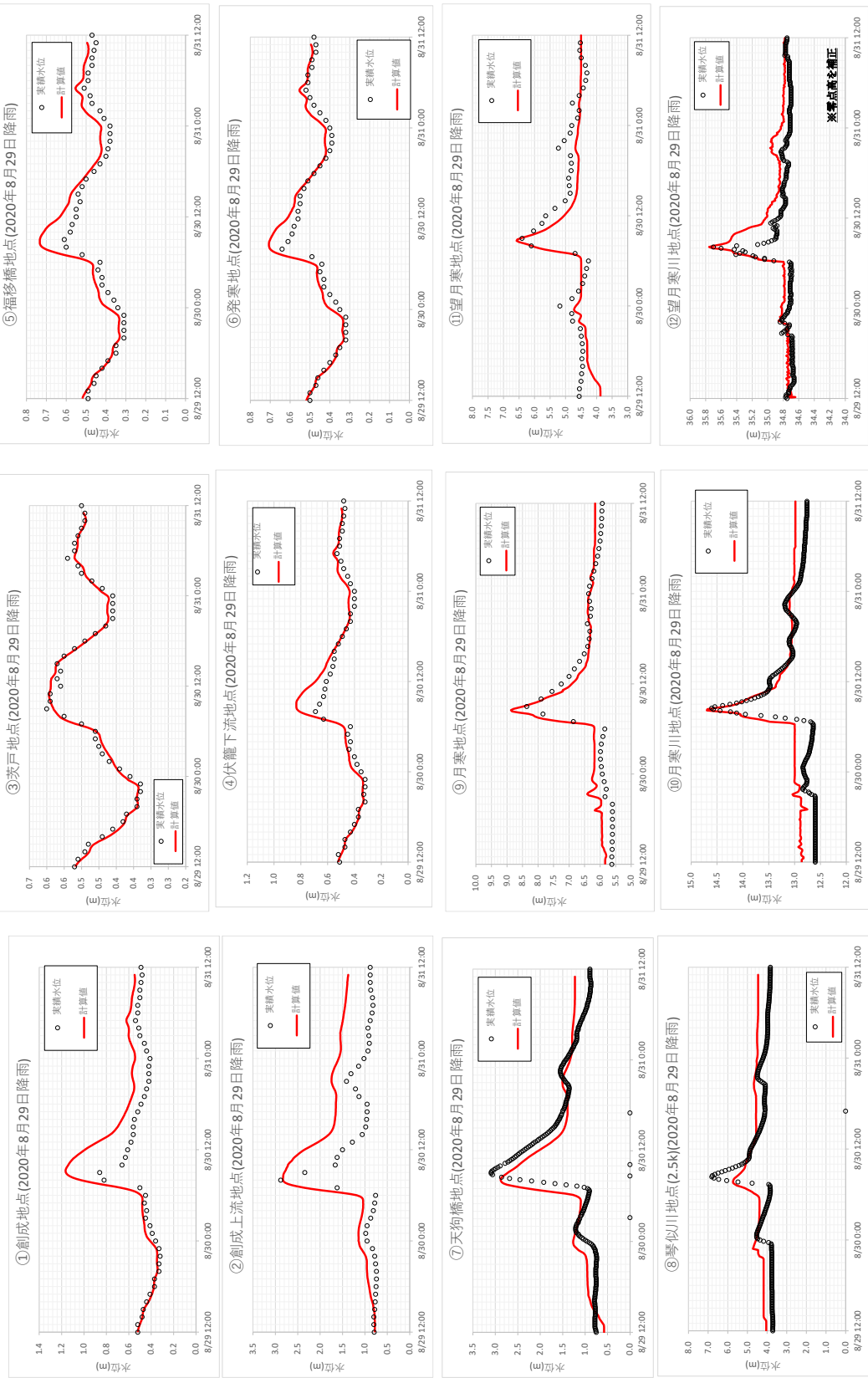


図 2.3.36(1) 河川水位の検証結果(2020 年 8 月 29 日降雨) (①～⑫)

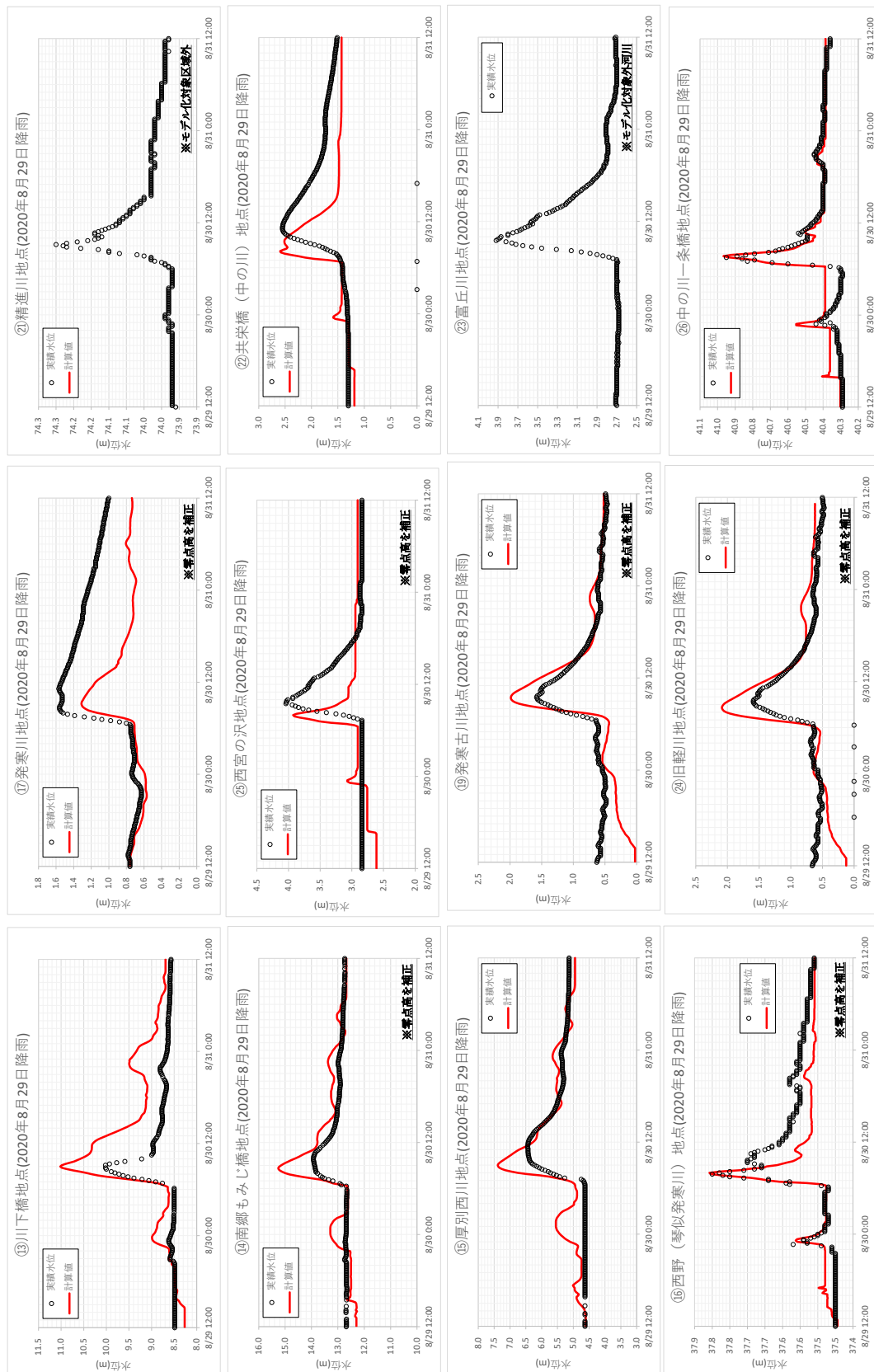


図 2.3.36(2) 河川水位の検証結果(2020 年 8 月 29 日降雨) (⑬～⑰, ⑲, ㉑～㉓)

2.4 高解像度内外水同時解析モデルの開発

本研究で実施した再現計算や現地調査による浸水発生メカニズムを踏まて、以下の内容を反映した高解像度内外水同時解析モデルの開発を実施した。

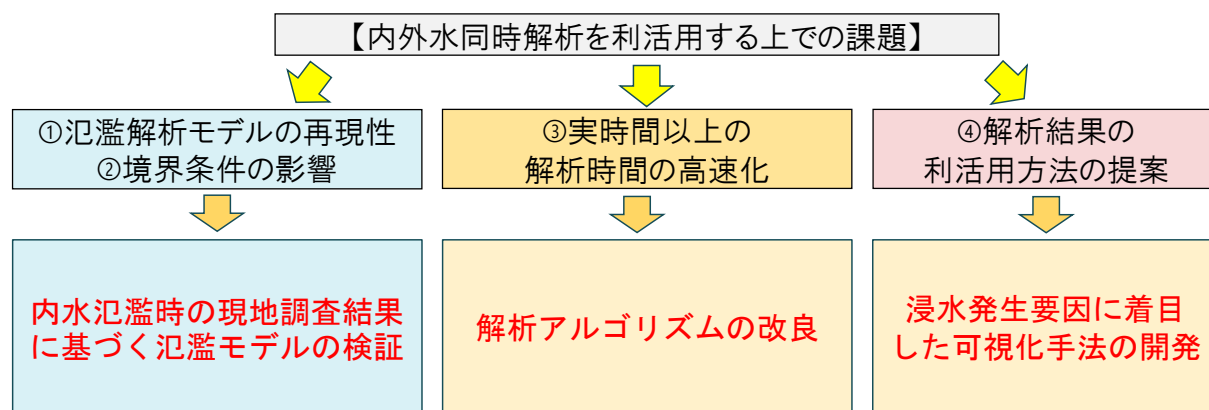


図 2.4.1 解析モデルの改良

2.4.1 内水氾濫時の現地調査結果に基づく氾濫モデルの改良

令和3年8月4日降雨を対象に、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。窪地湛水を考慮する方法として降雨を分離する手法を提案しており、その現象が実現象においても生じていることを現地調査を持って確認した。また、内水氾濫の発生は、下水道管路からのスポット的な氾濫であることを踏まえて、内水氾濫発生時の氾濫量をマンホールメッシュに分配する手法に改良を実施した。

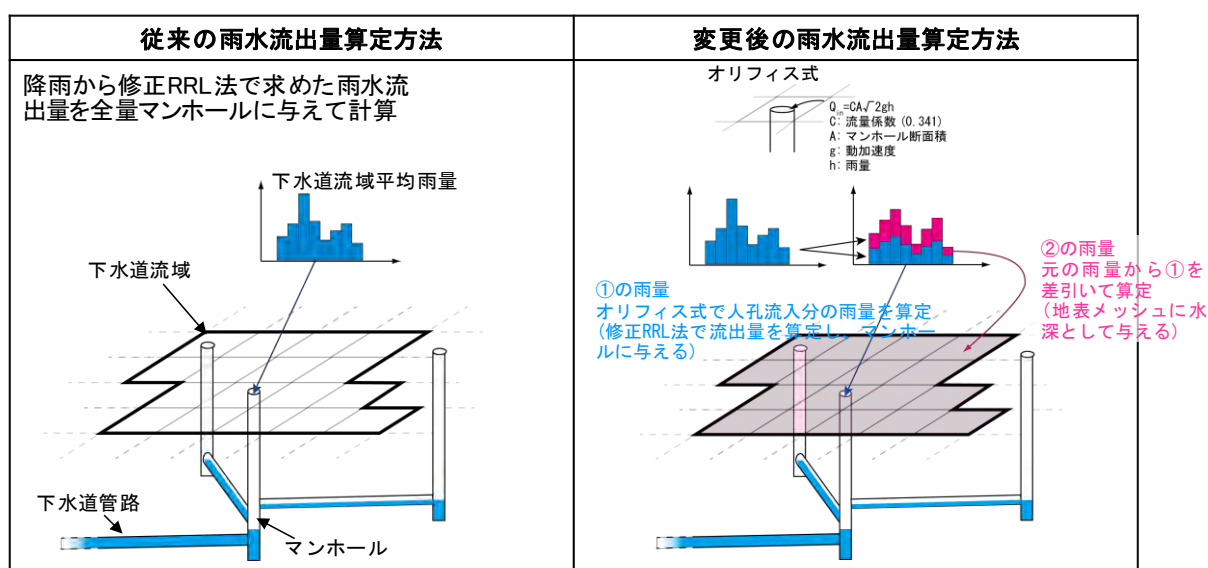


図 2.4.2 降雨を分離した境界条件の設定

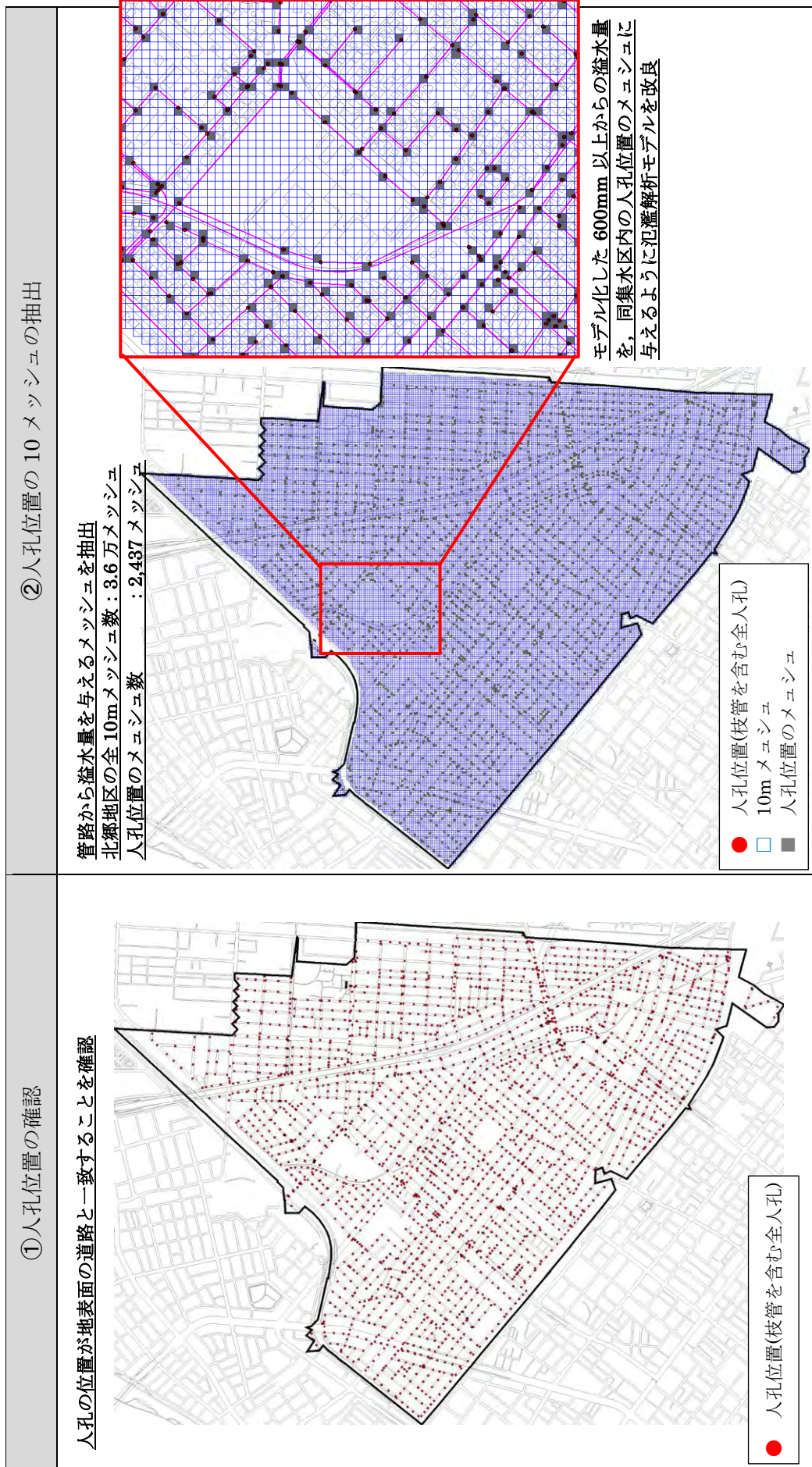


図 2.4.3 枝管位置の確認と溢水対象メッシュの設定

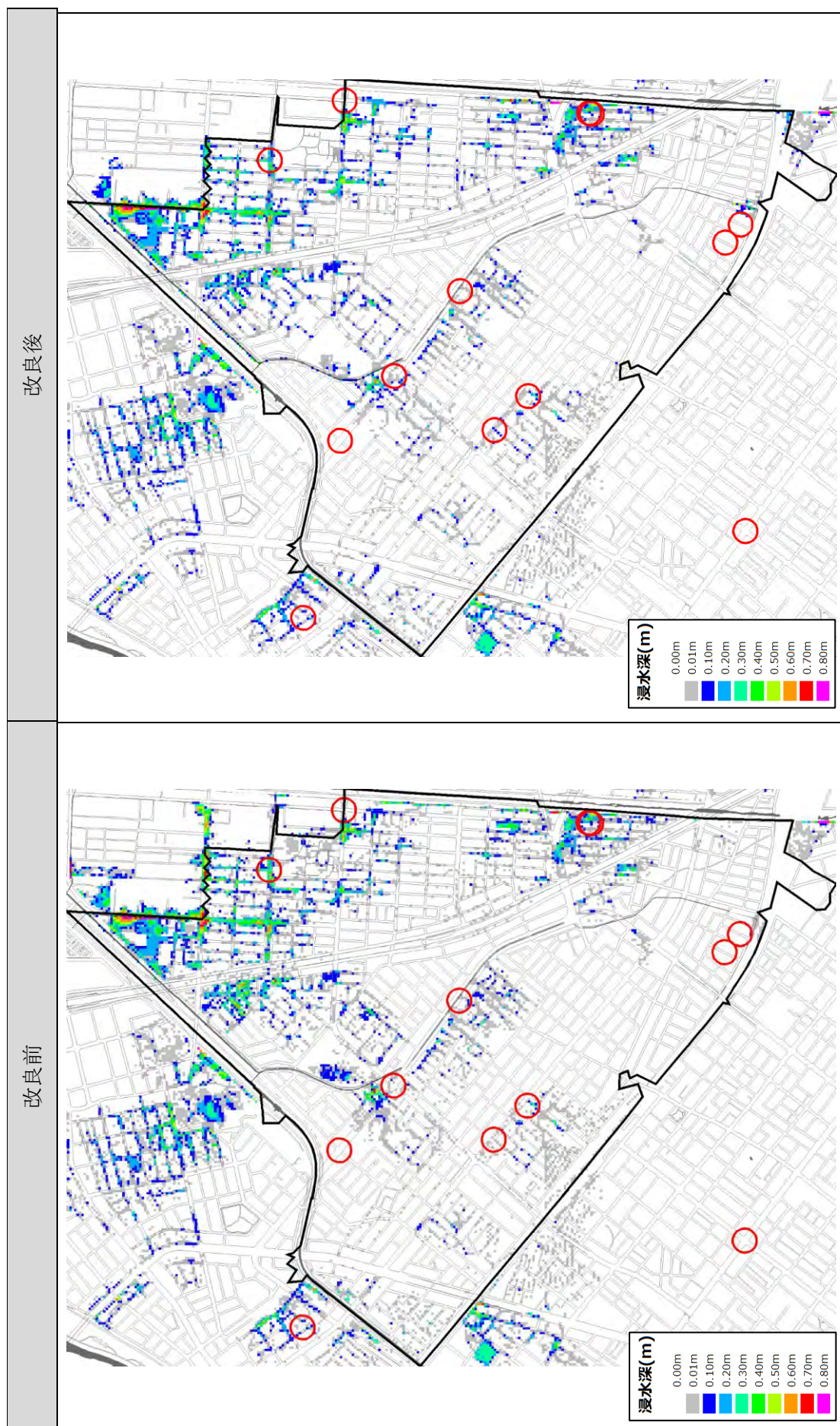


図 2.4.4 計画降雨(35mm/hour)での解析結果の比較

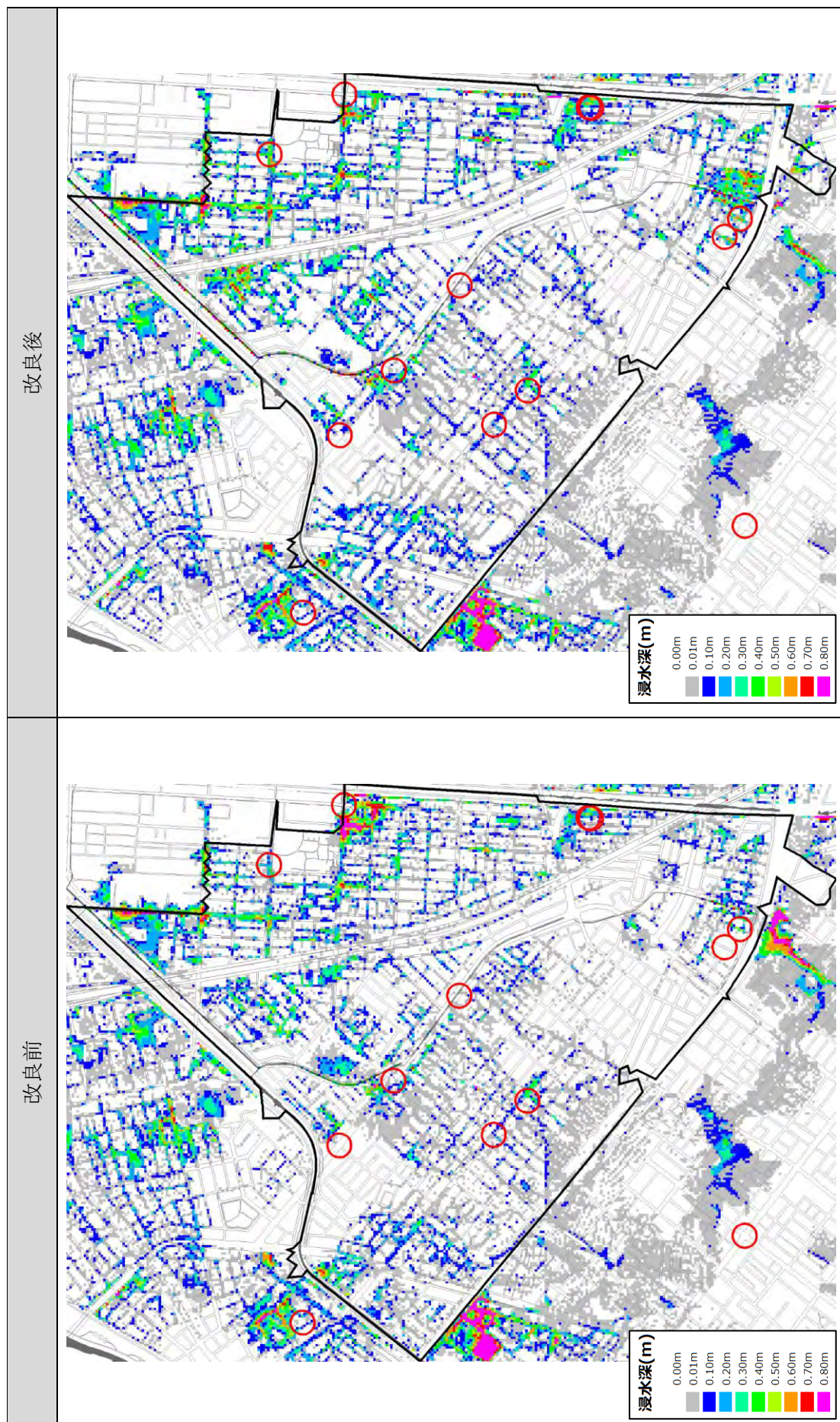


図 2.4.5 想定最大規模降雨(125mm/hour)での解析結果の比較

2.4.2 境界条件の設定

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の再現性に大きく影響をすることを示した。内外水同時解析を実施するに当たり時間解像度の重要性を示した。

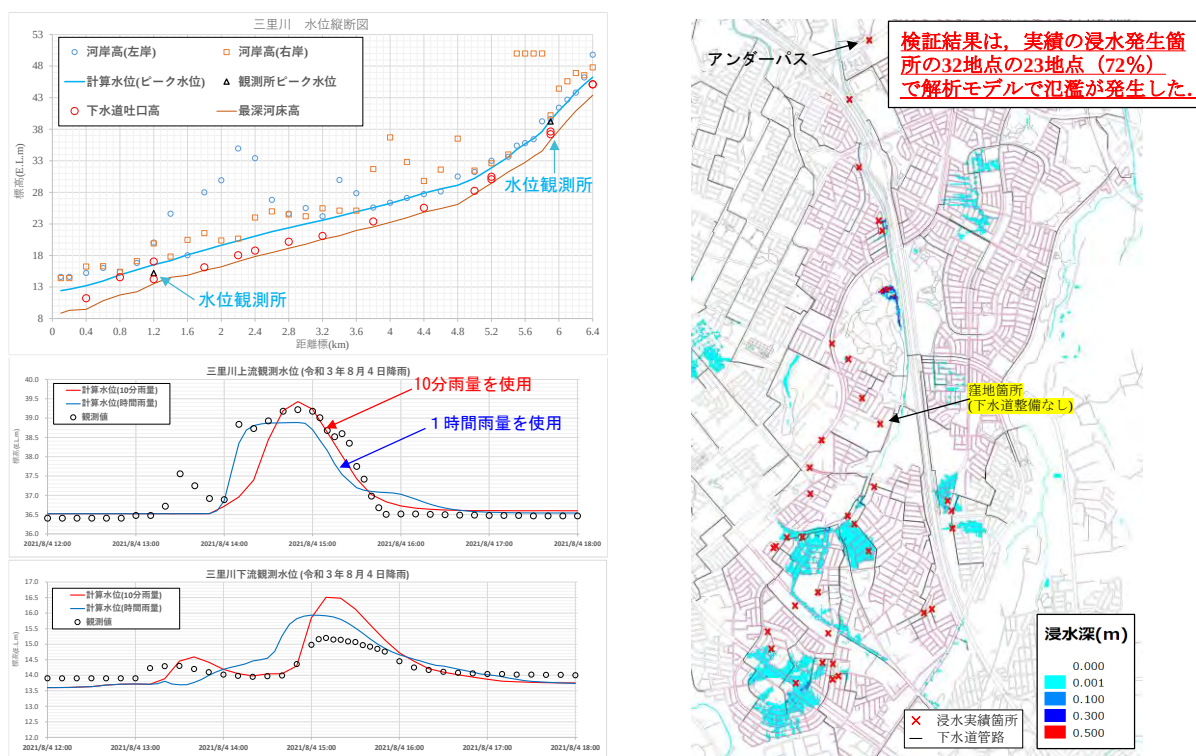


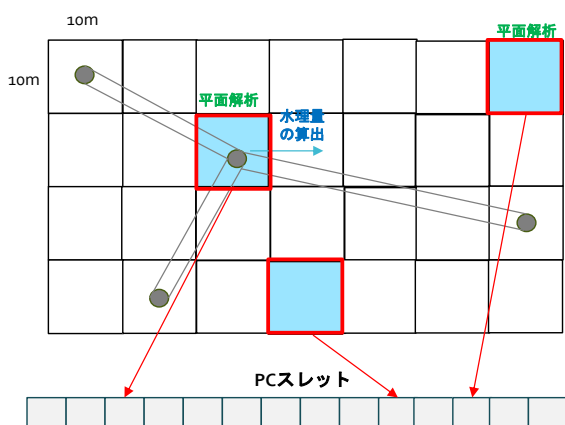
図 2.4.6 境界条件と再現性の関係性

2.4.3 実時間以上の解析時間の高速化

内外水同時解析では、河川水位の不定流計算、下水道水位の不定流計算、堤内地の平面二次元不定流計算という複数の数値解析を実施するために1時間の解析に1時間程度の時間を要していた。本モデルを用いて複数の降雨シナリオや波形を対象に計算を実施する場合は、数ヶ月の時間を要してしまう。2つアプローチによって解析時間を実時間の半分程度(1.5倍)まで高速化を実施した。

OpenMPIによるスレッド並列化の実施

OpenMP演算子を使用し、各地表メッシュの水理量の計算をスレッド並列化で効率的に実施



下水道集水区単位の順次計算領域の拡張

各解析の演算時間を算出すると平面二次元解析による演算負荷が多いことが分かる

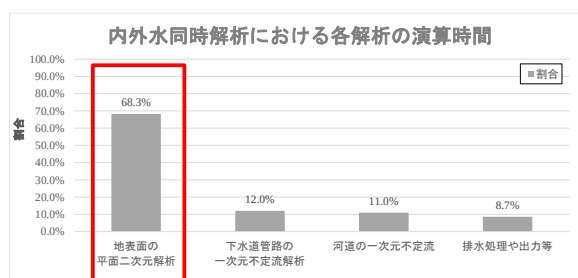


図 2.4.7 実時間以上の解析時間の高速化

- 内外水同時解析では、河川水位の不定流計算、下水道水位の不定流計算、堤内地の平面二次元不定流計算という複数の数値解析を実施するために1時間の解析に1時間程度の時間を要していた。
- 本モデルを用いて複数の降雨シナリオや波形を対象に計算を実施する場合は、数ヶ月の時間を要してしまう。
- 2つアプローチによって解析時間を実時間の半分程度(1.5倍)まで高速化を実施した。

検証計算や現地踏査において内水氾濫はスポット的に溢水が発生することを仮定

既存のアルゴリズムでは内水解析メッシュの水収支を常時解析を実施

マンホールの溢水をトリガーとし、下水道集水区単位で解析領域を拡張する手法を適応



図 2.4.8 地表氾濫領域の順次拡大のアルゴリズム

第 3 章

複合確率を用いた降雨外力評価方法の提案

3. 複合確率を用いた降雨外力評価方法の提案

本章では、降雨継続時間内雨量と洪水到達時間内雨量の生起確率を掛け合わせた複合確率を算出し、72 時間総雨量、短時間総雨量（8 時間）の両面から降雨の生起確率を評価する手法を提案した。降雨の確率評価は大量アンサンブル気候データの過去実験結果の年最大降雨量で行い、洪水到達時間は同データを用いた流出解析によるピーク流量と各降雨継続時間内の累積降雨量の相関関係等から設定した。大量アンサンブルデータを用いた複合確率により降雨波形を評価することで、実績の総雨量のみによる確率評価では把握することができなかった高頻度・高浸水リスクが想定される降雨の存在を示すものである。

3.1 気候変動予測降雨データ活用の背景

近年、全国各地で既往最大規模を超える降雨や過去に経験したことのない降雨波形によって洪水被害が頻発している。2019 年台風 19 号では、気象庁の雨量観測所 120 地点で観測史上 1 位の雨量(12 時間雨量)を記録した。近年の豪雨災害の頻発は、地球温暖化に伴う気候変動による影響が示唆されており、日本政府は気候変動を考慮した治水計画の見直しを提言した。近年、気候変動を踏まえた治水計画の見直しには、Mizuta et al.ら(2017)の d4PDF (地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース, database for Policy Decision making for Future climate change)といった大量アンサンブル気候データ(以降、アンサンブルデータと称する)が用いられている。実験結果は、過去の気候状態で 3,000 年分と、将来において全球平均気温が 4℃上昇した気候状態で 5,400 年分が存在する。治水計画で使用される降雨観測値は、実績の数十年の観測値のみであり、特に治水計画の目標となる計画規模相当の実績降雨は、数事例しかないことが殆どであるが、アンサンブルデータにより計画規模相当の過去に起こり得た降雨と将来起こり得る降雨を含めて治水安全度を評価することができる。アンサンブルデータを用いた実河川における降雨の確率評価では、既往研究において計画規模相当の降雨が有する不確実性が信頼区間の幅として定量化されている。この計画規模相当の降雨の幅は、Yamada・Shimizu ら(2019)がアンサンブルデータによる物理的モンテカルロ計算結果としての解釈と、実績観測値を用いて数理統計理論に基づくアプローチによる信頼区間としての解釈の両面から示されている。このことにより、物理・力学計算と極値統計による幅の大きさが一致したことで、本研究を含む関係する議論を進めることが可能となった。

3.2 治水計画における降雨の確率手法の概要

我が国の一級河川直轄管理区間の治水計画では、各河川の整備目標とする洪水規模(基本高水)を高水計画として検討してきた。全国 109 水系のうち 8 割以上の河川で雨量確率手法に基づき治水計画の目標とされる雨量(流量)が設定されている。雨量確率手法では、対象流域の過去の実績降雨・流量資料をもとに計画降雨継続時間を設定し、その期間内の降雨量(総雨量)を対象に確率評価をする。雨量確率法は、過去の年最大降雨量等をもとに確率評価し、対象河川の流域内の資産状況に合わせた目標確率(1/50 から 1/200 程度)の総雨量としている。その後、基本高水は、対象河川の基準地点における実績降雨量を計画降雨量となるように引き伸ばした計画降雨群を用いた流出解析から算定される流量をもとに設定している。

その他には、椎葉ら(2013)の総合確率法が用いられている。本手法は、同総降雨量に引き伸ばした複数の降雨に対して流出解析を行い、同じ年最大洪水ピーク流量での総降雨量の非超過確率から、その洪水ピーク流量の非超過確率を求める手法である。これは、流出解析を介して降雨の時空間的な特性を評価している。一方、降雨強度については、松田ら(1996)が 1 時間雨量の時間的な集中度に注目し、1 時間雨量の超過確率を算定する手法を提案しており、既往研究において標本とする 1 時間雨量の多い豪雨イベントが数十年の実績降雨では不足していることを課題としている。

3.3 複合確率を用いた降雨外力評価方法の提案

近年の浸水被害を踏まえると、今までに経験した実績降雨がどれほど危険なものかを評価し、今後の治水計画を検討する必要がある。また、豪雨時の浸水被害は、著者らの既往研究において計画降雨継続時間内の雨量(以降、総雨量と称する)だけではなく最大降雨強度にも関係することを示しており、治水計画で降雨を評価する指標である総雨量のみでは評価しきれないことが考えられる。更に、降雨がどのような時空間分布かによっても河川への流出量に変化し浸水被害が変化する。本研究は、治水計画で用いられる総雨量に加えて、河川のピーク流量に寄与する洪水到達時間内雨量をそれぞれ確率評価し、掛け合わせることで複合確率として降雨量の生起確率を相対的に評価する手法を提案するものである。各降雨量の確率評価は、アンサンブルデータの過去実験結果を用いて総雨量と洪水到達時間内雨量をそれぞれ確率評価した。そして、総雨量と洪水到達時間内雨量を用いた複合確率によって相対的に降雨の危険性を評価した。本手法は、アンサンブルデータを活用することにより、懸案地点の上流域における降雨の時間変化を洪水到達時間内雨量として評価し、降雨量のみを用いて、計画規模相当の降雨外力を評価するものである。

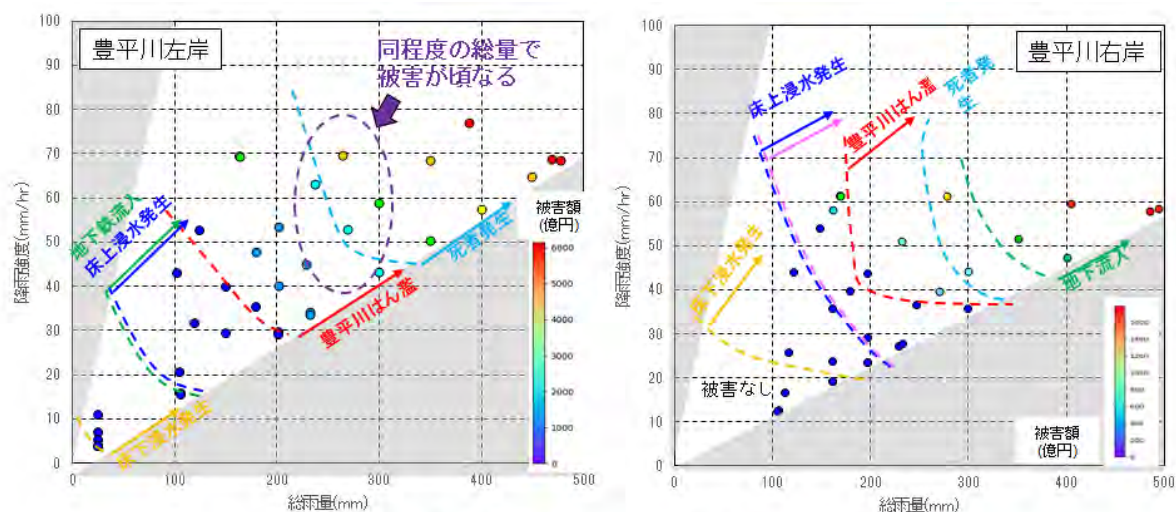


図-豊平川を対象とした浸水被害特性の分析

- ① 数十年の実績雨量では、**浸水被害が発生するような降雨イベント(パターン)を網羅することは困難**である。
- ② 同総雨量でも降雨強度や降雨波形が異なることで浸水被害が変化するため、**各降雨イベントの生起確率を算出する必要がある**。

図 3.3.1 内外水同時解析を用いて様々な降雨規模を対象に浸水被害特性の分析

表 3.3.1 令和元年東日本台風で観測史上1位を更新した雨量観測所数と最大更新値

最大時間降水量	観測史上1位を更新した地点数	最も観測値更新率が高い地点		
		更新値(更新前)	割合 (更新後/更新前)	地点名
最大1時間降水量	9	95mm(65mm)	146%	普代（岩手県）
最大3時間降水量	40	211.5mm(126mm)	168%	宮古（岩手県）
最大6時間降水量	89	236mm(130mm)	202%	葛生（栃木県）
最大12時間降水量	120	384mm(177mm)	217%	葛生（栃木県）
最大24時間降水量	103	410mm(216.5mm)	234%	葛生（栃木県）
最大48時間降水量	72	416.5mm(250mm)	256%	葛生（栃木県）
最大72時間降水量	53	285mm(183mm)	156%	菅平（長野県）

※気象庁：令和元年東日本台風（台風第19号）による大雨、暴風等 令和元年(2019年)10月10日～10月13日（速報）の公開データから作成

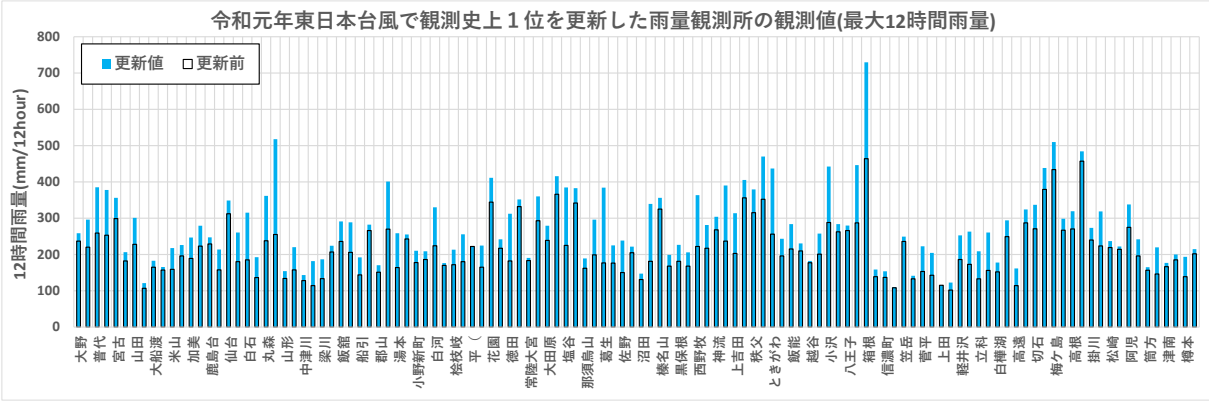


図 3.3.2 令和元年東日本台風で観測史上1位を更新した雨量観測所数と最大更新値

3.3.1 対象流域とアンサンブルデータの概要

本研究では、気候変動により将来における降雨量の変化倍率が大きくなる北海道の札幌市を貫流する石狩川水系豊平川を対象とした。本研究では、d4PDF が提供する領域 20km メッシュモデルの出力値を境界条件とし、山田ら(2018)が北海道を領域を対象に 5km メッシュモデルで力学的ダウンスケーリングした数値実験結果(以降、実験結果)を用いた。図 3.3.3 に示すように実験結果は、対象流域内の地上観測所より密な空間分布となっている。なお、この実験結果は、石狩川の基準地点の石狩大橋地点の年最大降雨イベントを対象に力学的ダウンスケールを実施した実験結果を用いている。豊平川の基準地点である雁来地点上流域を対象に、1926 年から 2019 年の実績降雨(約 90 イベント)と 5km 実験結果(過去 60 年×50 メンバー=3,000 イベント)の年最大降雨の頻度分布を比較した。年最大降雨量は、豊平川の計画降雨継続時間 3 日間(72 時間)で算出した。図 3.3.4 は総雨量の最頻値は同じ値を示しており、既往最大洪水である昭和 56 年 8 月下旬降雨(総雨量約 240mm)と同等の降雨が複数存在している。実績では標本データの少ない計画規模相当の降雨を、アンサンブルデータを活用することで複数の降雨波形での検討が可能なことを示している。なお、本研究では、後述の過去実験結果を用いた流出解析値と実績値の比較結果を踏まえて、アンサンブルデータが対象域の降雨特性を表現していると考えてバイアス補正は実施していない。

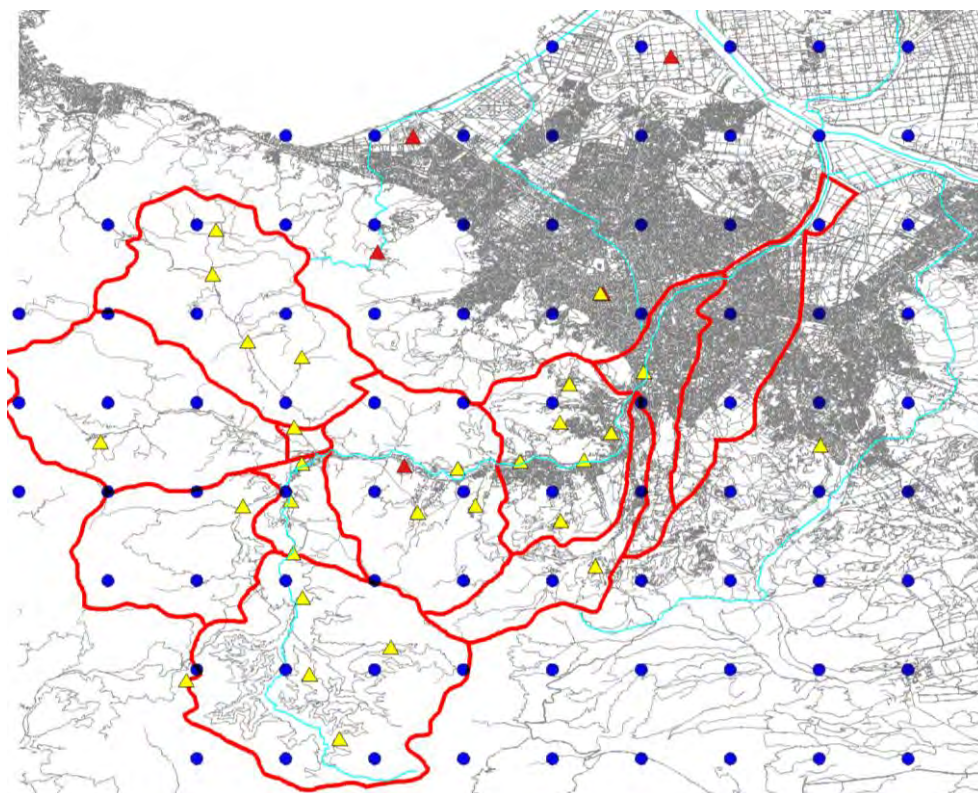


図 3.3.3 豊平川流域における雨量観測所位置と d4PDF の 5km メッシュ配置

表 3.3.2 実績降雨とアンサンブルデータの過去実験データの諸元

対象データ	データ数	対象期間
実績降雨イベント	93年分	1926年～2019年
5km実験結果	3,000年分	1951年～2010年(60年×50メンバー)

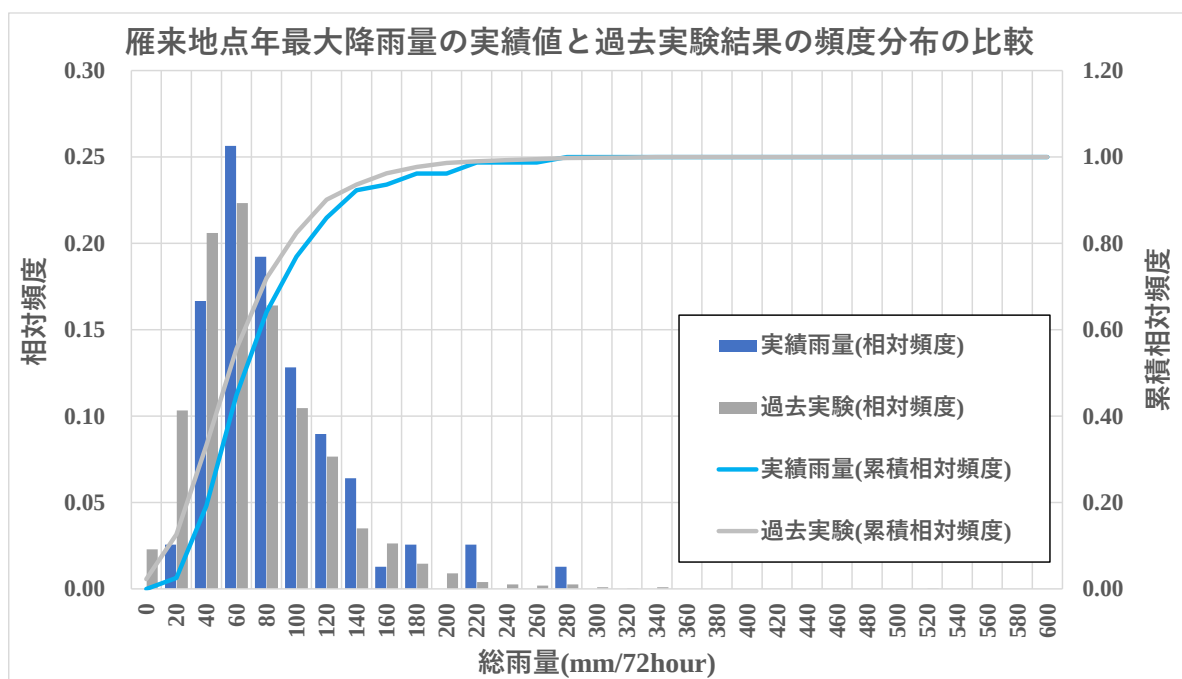


図 3.3.4 豊平川基準地点上流域(雁来地点)における年最大降雨量の実績値と過去実験結果の頻度分布の比較

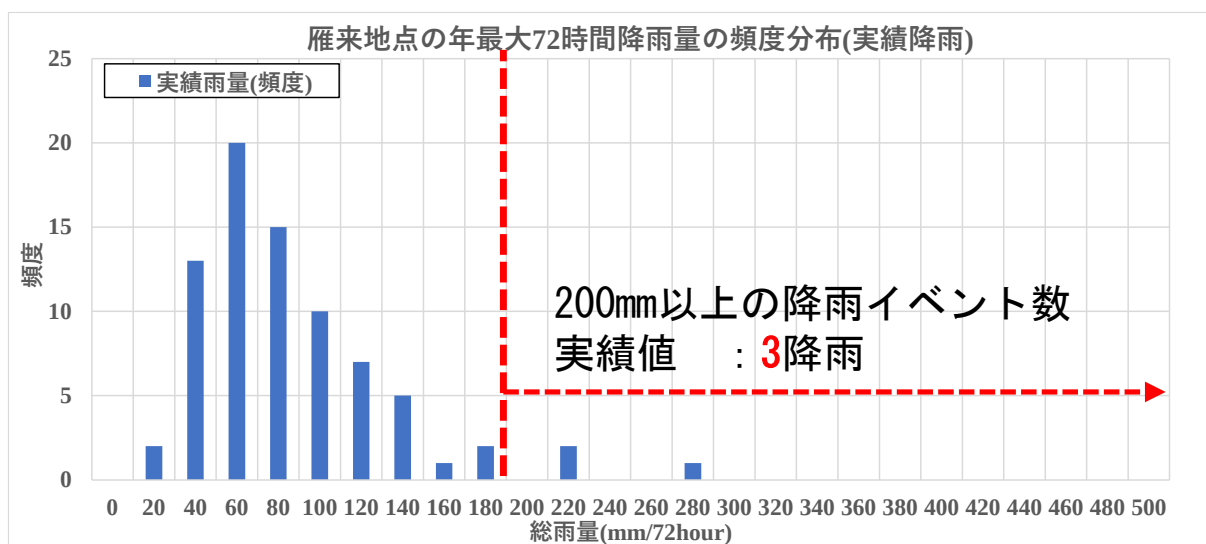


図 3.3.5 豊平川基準点の実績降雨の年最大 72 時間雨量の頻度分布

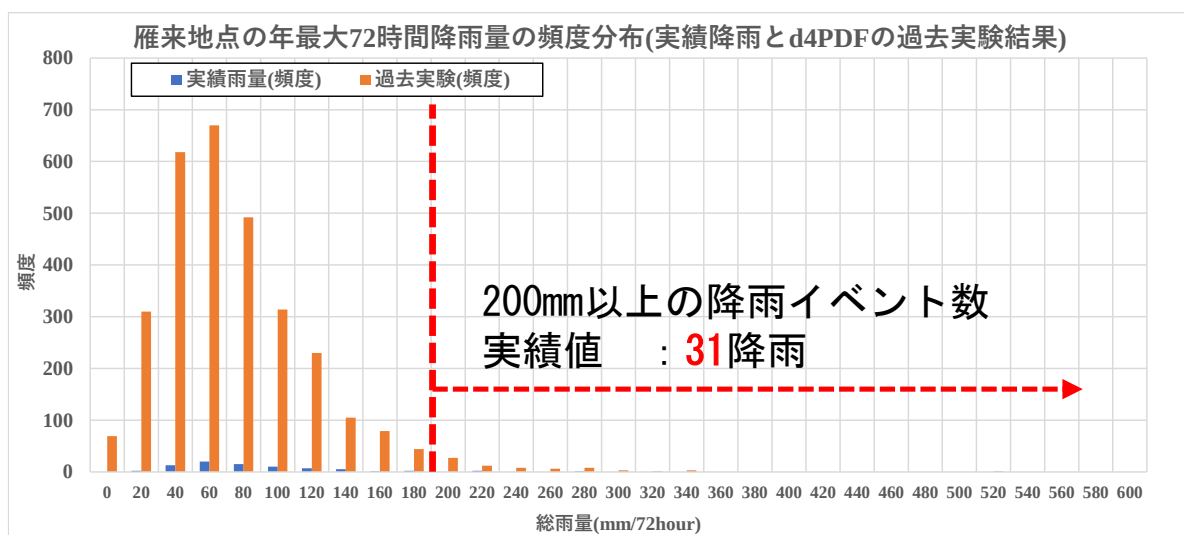


図 3.3.6 豊平川基準点の d4PDF(過去実験)の年最大 72 時間雨量の頻度分布

豊平川基準点上流域の d4PDF(過去実験)の降雨イベントの流域平均雨量を対象に、空間分布を確認する。大量アンサンブルデータの過去実験結果は、降雨の時間変化や空間変化の異なる様々な降雨が存在する。時空間的の降雨特性を考慮して降雨を評価することは、対象とする次元が増加することで複雑な手法となる。複雑な情報を縮約するために、対象流域で被害が急増する豊平川の氾濫に影響するピーク流量に寄与する洪水到達時間に着目した。

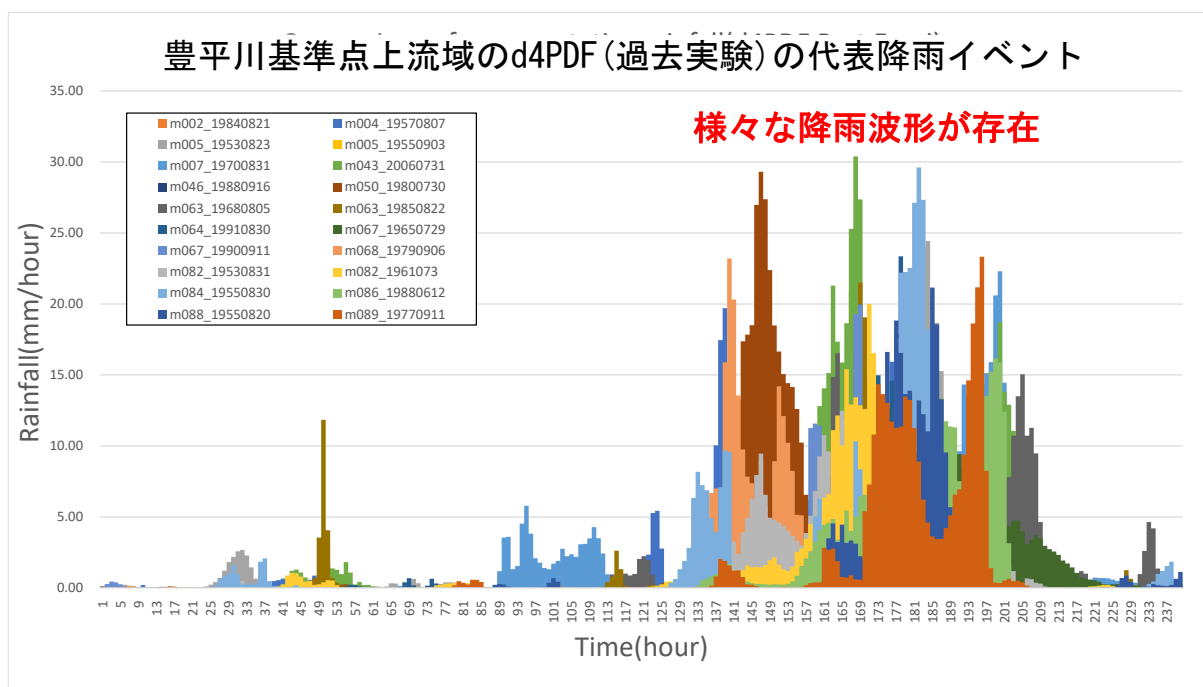


図 3.3.7 豊平川基準点上流域の d4PDF(過去実験)の降雨イベント(抜粋)

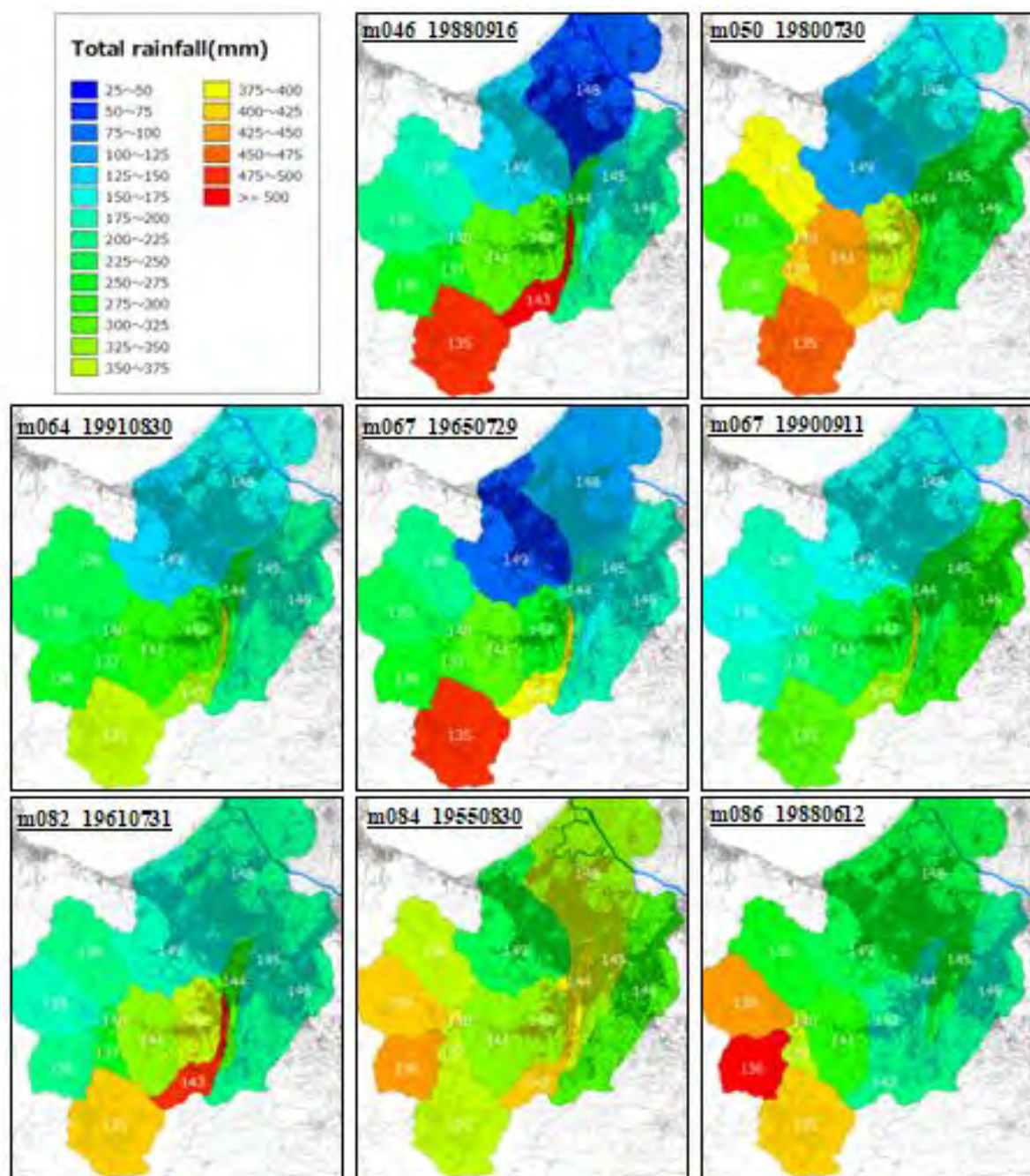


図 3.3.8(1) 豊平川基準点上流域の d4PDF(過去実験)の降雨イベントの流域平均雨量

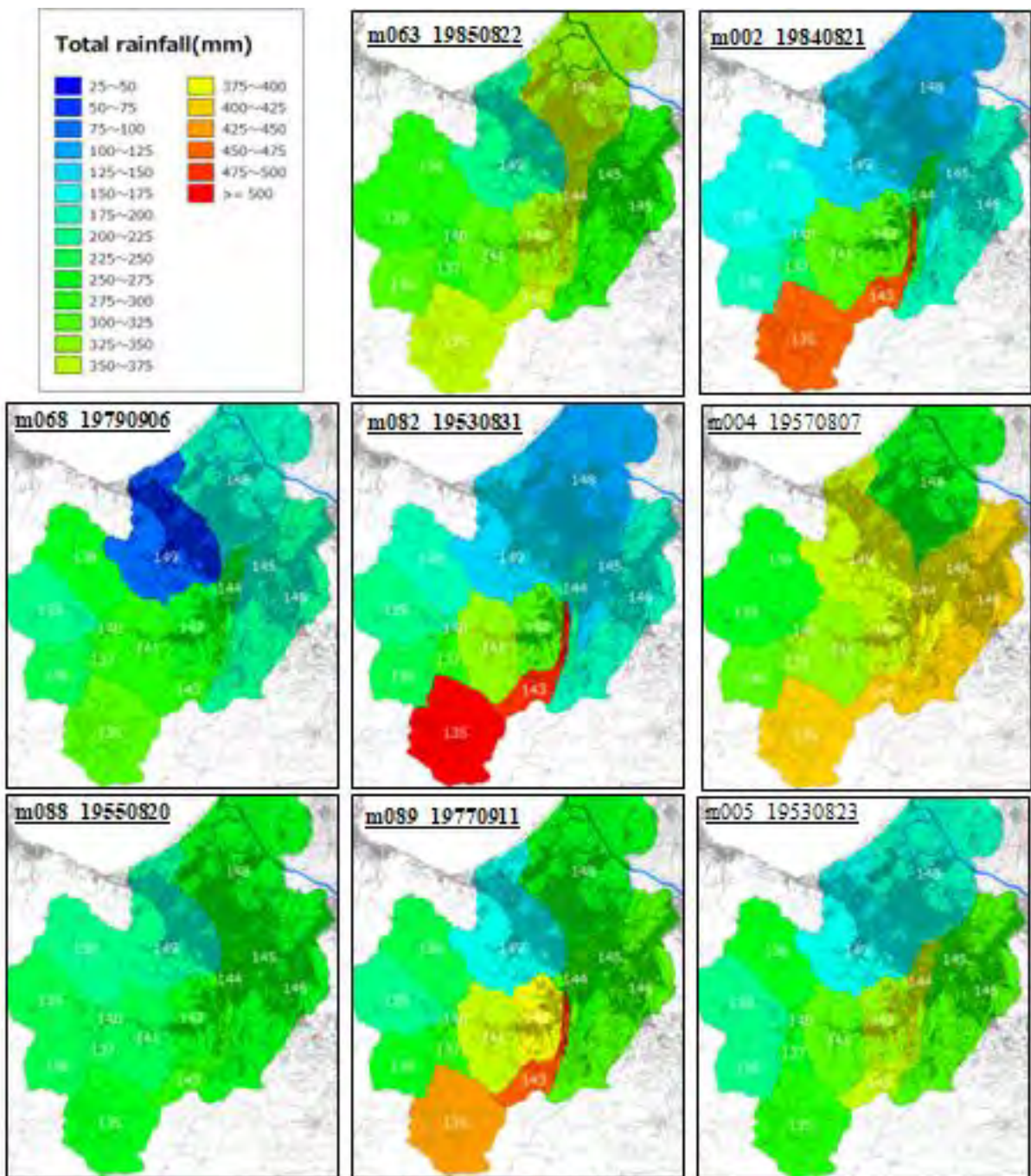


図 3.3.8(2) 豊平川基準点上流域の d4PDF(過去実験)の降雨イベントの流域平均雨量

雁来上流域の平均雨量を対象に降雨継続時間(総雨量算定期間)ごとに、総雨量のカバー状況を分析した。雁来上流域では、72 時間と 48 時間で抽出した上位降雨は概ね一致する結果となった。降雨継続時間が 24 時間以下では、降雨量の上位の降雨を抽出しきれていない。中小河川や下水道に氾濫の危険性の高い降雨波形がある可能性も考えられる。

表 3.3.3 雁来上流域の降雨継続時間(総雨量算定期間)の各雨量の順位

順位	降雨名	72hour	48hour	24hour	12hour
1	HPB_m043_20060731	1	1	2	2
2	HPB_m050_19800730	2	2	1	1
3	HPB_m007_19700831	3	3	9	-
4	HPB_m089_19770911	4	4	-	-
5	HPB_m046_19880916	5	7	-	-
6	HPB_m063_19850822	6	8	17	-
7	HPB_m082_19530831	7	10	-	-
8	HPB_m084_19550830	8	5	-	-
9	HPB_m005_19530823	9	6	3	4
10	HPB_m086_19880612	10	18	-	-
11	HPB_m005_19550903	11	11	-	-
12	HPB_m082_19610731	12	13	6	-
13	HPB_m064_19910830	13	9	8	15
14	HPB_m063_19680805	14	-	-	-
15	HPB_m002_19840821	15	19	-	-
16	HPB_m088_19550820	16	12	7	-
17	HPB_m067_19900911	17	-	-	-
18	HPB_m004_19570807	18			-
19	HPB_m068_19790906	19	15	-	-
20	HPB_m067_19650729	20	-	-	-

表 3.3.4 雁来上流域の降雨継続時間(総雨量算定期間)の各雨量の順位

順位	72時間雨量	降雨名	48時間雨量	降雨名	24時間雨量	降雨名	12時間雨量	降雨名
1	523.852	HPB_m043_20060731	411.501	HPB_m043_20060731	315.845	HPB_m050_19800730	238.719	HPB_m050_19800730
2	328.682	HPB_m050_19800730	325.389	HPB_m050_19800730	300.937	HPB_m043_20060731	229.53	HPB_m043_20060731
3	305.978	HPB_m007_19700831	295.705	HPB_m007_19700831	236.014	HPB_m005_19530823	199.242	HPB_m084_19550830
4	295.006	HPB_m089_19770911	269.049	HPB_m089_19770911	226.577	HPB_m084_19550830	189.651	HPB_m005_19530823
5	276.691	HPB_m046_19880916	264.375	HPB_m084_19550830	213.804	HPB_m002_19660818	174.864	HPB_m002_19660818
6	271.205	HPB_m063_19850822	258.909	HPB_m005_19530823	209.043	HPB_m082_19610731	173.865	HPB_m043_19640730
7	268.949	HPB_m082_19530831	254.994	HPB_m046_19880916	208.54	HPB_m088_19550820	164.387	HPB_m045_19970830
8	264.505	HPB_m084_19550830	252.731	HPB_m063_19850822	206.77	HPB_m064_19910830	162.23	HPB_m023_19870809
9	259.39	HPB_m005_19530823	248.299	HPB_m064_19910830	203.932	HPB_m007_19700831	159.709	HPB_m083_19730807
10	259.293	HPB_m086_19880612	246.685	HPB_m082_19530831	202.226	HPB_m004_20000822	159.48	HPB_m006_20060824
11	254.633	HPB_m005_19550903	240.449	HPB_m005_19550903	192.828	HPB_m043_19640730	158.677	HPB_m021_19560815
12	253.821	HPB_m082_19610731	239.786	HPB_m088_19550820	192.42	HPB_m006_20060824	157.468	HPB_m047_19910721
13	248.494	HPB_m064_19910830	237.452	HPB_m082_19610731	190.813	HPB_m045_19970830	155.863	HPB_m030_19630801
14	242.166	HPB_m063_19680805	221.095	HPB_m002_19660818	190.299	HPB_m083_19730807	155.294	HPB_m084_19750906
15	241.125	HPB_m002_19840821	214.778	HPB_m068_19790906	188.869	HPB_m021_19560815	154.815	HPB_m064_19910830
16	239.789	HPB_m088_19550820	214.442	HPB_m067_19780913	187.412	HPB_m046_20100727	153.894	HPB_m022_19970903
17	233.253	HPB_m067_19900911	214.437	HPB_m004_20000822	182.886	HPB_m063_19850822	152.599	HPB_m062_19920809
18	232.857	HPB_m004_19570807	211.37	HPB_m086_19880612	181.775	HPB_m030_19630801	149.67	HPB_m004_20000822
19	229.871	HPB_m068_19790906	208.859	HPB_m002_19840821	181.251	HPB_m003_19790812	141.006	HPB_m089_20080823
20	226.356	HPB_m067_19650729	207.387	HPB_m087_20060824	180.413	HPB_m087_20060824	140.458	HPB_m046_20100727

3.3.2 洪水到達時間内雨量を用いた複合確率手法の提案

複合確率では、総雨量とどの時間スケールの雨量を用いて評価するかが重要となる。著者らは、既往研究において豊平川を対象に浸水被害特性を分析しており、豊平川が決壊することで浸水被害が急増することを示した。なお、豊平川が決壊条件は、浸水想定区域図の検討等と同様に河川水位が計画高水位に到達することで生じるものとしていた。そのため、豊平川が決壊の有無は、豊平川のピーク水位(流量)が指標となり、豊平川のピーク流量に影響する時間内の降雨量が重要であると考えられる。

(1) 洪水到達時間の設定

一般的に、懸案地点の上流域に降った降雨がどれほどの時間で到達するかを示す指標として洪水到達時間がある。洪水到達時間を算定する手法は、治水計画ではクラークの式、土木研究所の経験式等が高水計画検討では降雨ピークと流出ピークの時間差の2倍とする手法等がある。一般的な手法であるクラークの式は、降雨の河道への流入時間と(1)式の河道流下時間の和で洪水到達時間を算定する。クラークの式は、最上流地点から懸案地点までの河道延長 $L(m)$ と洪水伝播速度 $W(m/s)$ を用いて洪水到達時間を算出することができる。

$$T = \frac{1}{3,600} \frac{L}{W} \quad (1)$$

豊平川は急流河川であり土木研究所の経験式の適用範囲外となるためにクラークの式を用いて洪水到達時間を算定した。雁来地点までの洪水到達時間は、最上流地点から雁来地点まで河道延長約 60km と洪水伝播速度 2.1m/s (流路勾配 1/220) を(1)式に代入し、山地流域の河道への流入時間 0.5 時間を加え 8.4 時間となる。しかしながら、豊平川上流域の降雨の時空間分布や洪水調節機能を有するダムによる洪水到達時間への影響が懸念される。そのため、流出解析によって降雨の時空間分布等を踏まえた洪水到達時間を設定した。

(2) アンサンブルデータを用いた洪水到達時間の検討

雁来地点上流域を対象に貯留関数法を用いて流出解析を実施した。解析モデルの定数は、治水計画の定数を参考に近年で比較的流出量の大きい 2011 年 9 月 6 日降雨で同定した値を用いた。図 3.3.9 に検証降雨での実績流量と解析流量の比較結果を示しており、雁来地点の流量の時間変化を概ね再現していることを確認した。

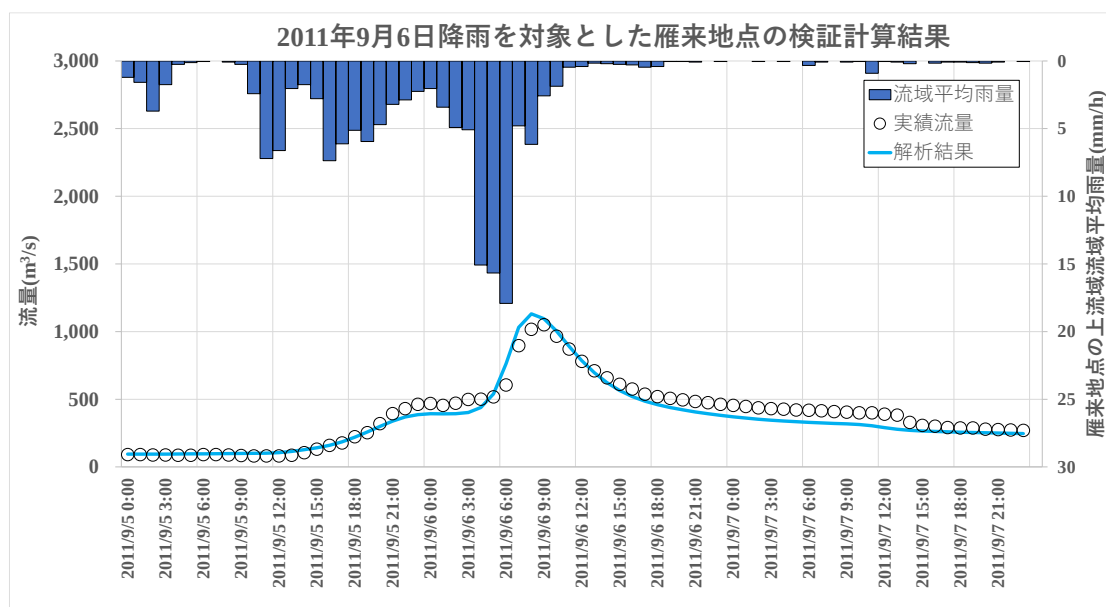


図 3.3.9 2011 年 9 月 6 日降雨を対象とした雁来地点の実績流と解析流量の検証計算結果

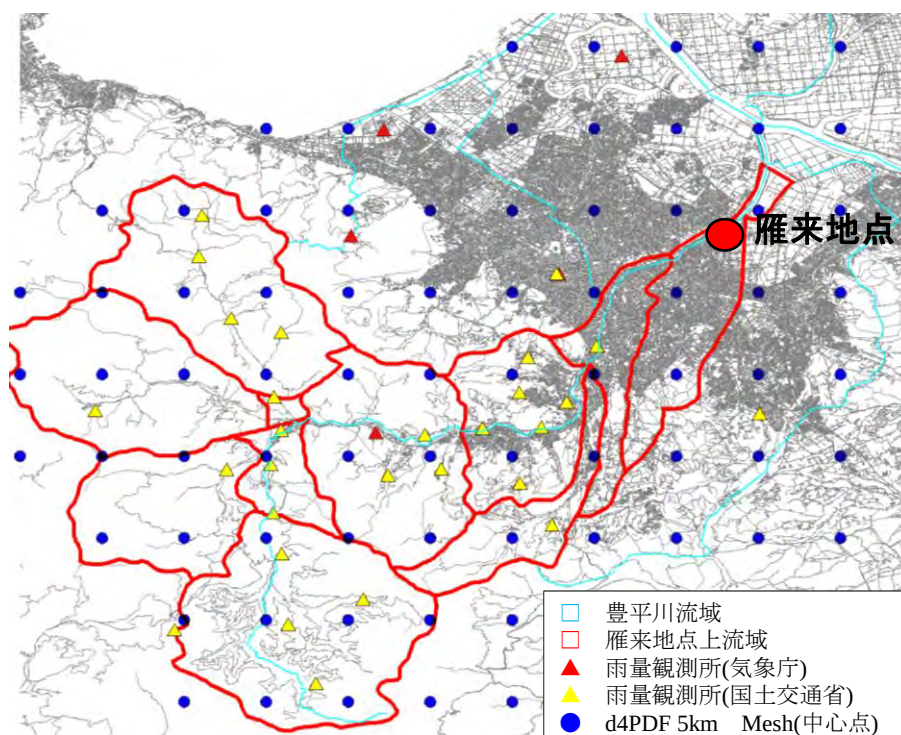


図 3.3.10 検証地点位置図

豊平川の流出特性を踏まえた洪水到達時間を設定するには、様々な降雨規模と空間分布の降雨で検討する必要がある。しかしながら、実績の降雨では、十分な標本データが存在しないため、アンサンブルデータの過去実験結果(3,000 イベント)を対象に流出解析を実施した。図 3.3.11 に流出計算のピーク流量と累積降雨量の相関関係の分析の流れを示す。

流出計算のピーク流量と累積降雨量の相関関係

降雨の時空間分布、ダムによる洪水調節による洪水到達時間への影響を明らかにするために、流出解析によるピーク流量と累積降雨量の相関関係を分析した。

【検討の流れ】

(1) 貯留関数法による流出計算モデルの構築

- ・ 流出係数：2011年9月6日降雨で同定した値
- ・ 治水施設：上流域の洪水調節ダムを考慮(計画の運用)
- ・ 飽和雨量： $R_{sa}=100\text{mm}$

(2) d4PDFの過去実験結果を用いた流出計算

⇒様々な降雨波形での洪水到達時間を算出

- ・ 計算期間：前期降雨等を含む15日間
- ・ 飽和雨量： $R_{sa}=100\text{mm}$

(3) 流出計算のピーク値と累積降雨時間の相関係数の算出

⇒流出計算のピーク流量と1時間から72時間の累積降雨量の相関係数を算出

図 3.3.11 流出計算のピーク流量と累積降雨量の相関関係の分析の流れ

流出解析期間は、前期降雨を含んだダウンスケール期間 15 日を対象とし、飽和雨量(Rsa)は治水計画で用いられる 100mm を設定した。なお、上流域のダムは、計画の操作規則で運用するものとした。表 3.3.5 は雁来地点での実績の年最大流量の平均値と過去実験結果の解析値の平均値の比較結果である。年最大流量の平均値は、実績値 407m³/s に対して流出解析値は 427m³/s と同程度の値を示している。なお、実績の平均年最大流量は、3 月から 4 月の融雪出水の影響を受けているものは除いている。最大値は、豊平川の既往最大流量を上回る降雨が発生している。最小値が実績値に比べて小さい要因は、ダウンスケール対象降雨が石狩川の石狩大橋地点の年最大降雨としているためであると考えられる。

図 3.3.12 は、総雨量とピーク流量の関係を示しており、既往最大洪水と同程度(約 240mm)の降雨でも降雨波形が異なればピーク流量は約 800m³/s から 2,800m³/s まで幅を持つことが分かる。これは、降雨の時間変化や空間分布の違いによってピーク流量が変化することを示している。図 3.3.13 に雁来地点の年最大ピーク流量の実績値と過去実験結果を用いた流出計算値の頻度分布を示す。実績では、数降雨しかない計画降雨規模相当の降雨を多様な波形で検討できることを示している。

表 3.3.5 雁来地点の実績の年最大流量の平均値と大量アンサンブルデータ過去実験での解析値の比較

対象データ	雁来地点年最大流量(m ³ /s)			備考
	平均値	最大値	最小値	
実績の観測値 (1973年～2019年(47年間))	407	1,417	87	既往最大 1,900m ³ /s (昭和56年8月下旬)
大量アンサンブルデータ 過去実験結果(3,000年)	427	3,626	33	石狩大橋地点を対象にダウンスケールした降雨データを使用

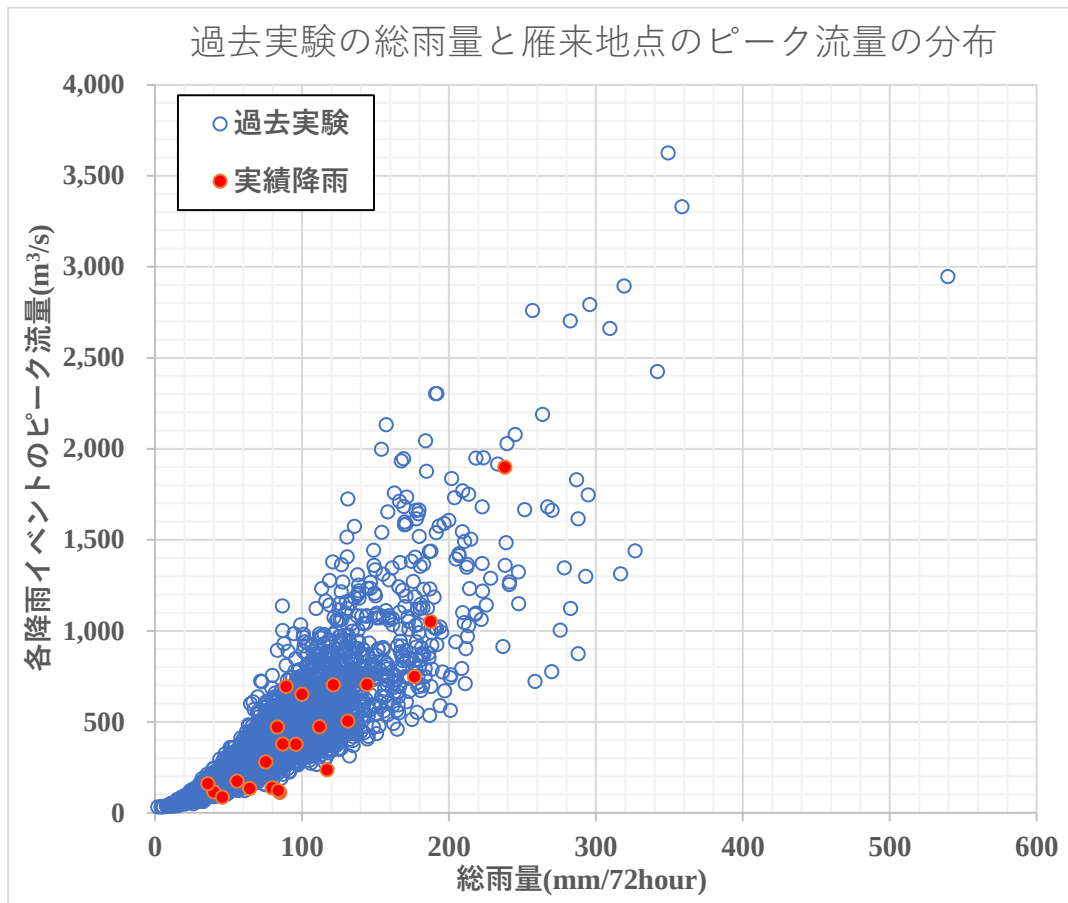


図 3.3.12 雁来地点の年最大ピーク流量の実績値と過去実験結果を用いた流出解析結果の頻度分布図

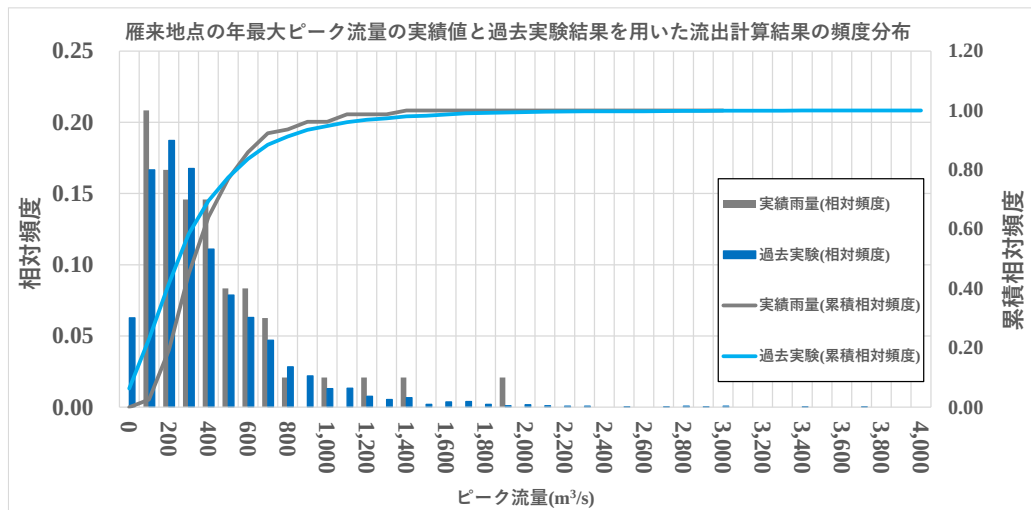


図 3.3.13 雁来地点の年最大ピーク流量の実績値と過去実験結果を用いた流出計算結果の頻度分布図

過去実験結果の流出計算結果を踏まえて、洪水到達時間を設定する指標として、流出計算結果のピーク流量と1時間から72時間までの各時間内雨量との相関係数を算出した。図 3.3.14 は、各降雨継続時間での累積雨量とピーク流量の関係を示しており、降雨継続時間が8時間から24時間の降雨量では、相関係数が0.90以上と非常に高くなっている。各降雨継続時間内雨量とピーク流量の関係を図 3.3.15 に示しており、相関係数が高い降雨継続時間8時間や12時間雨量は同雨量でのピーク流量の幅が図 3.3.12 の72時間に比べて小さいことが分かる。これらのことから、豊平川のピーク流量に8時間から24時間雨量が寄与していることを示している。各降雨時間の相関係数は、降雨の時空間特性による流出特性を、クラークヘンの式による洪水到達時間は、地形的な流出特性を示していると考えられる。そのためクラークヘンの式から算出され、相関係数が高い8時間を洪水到達時間とした。

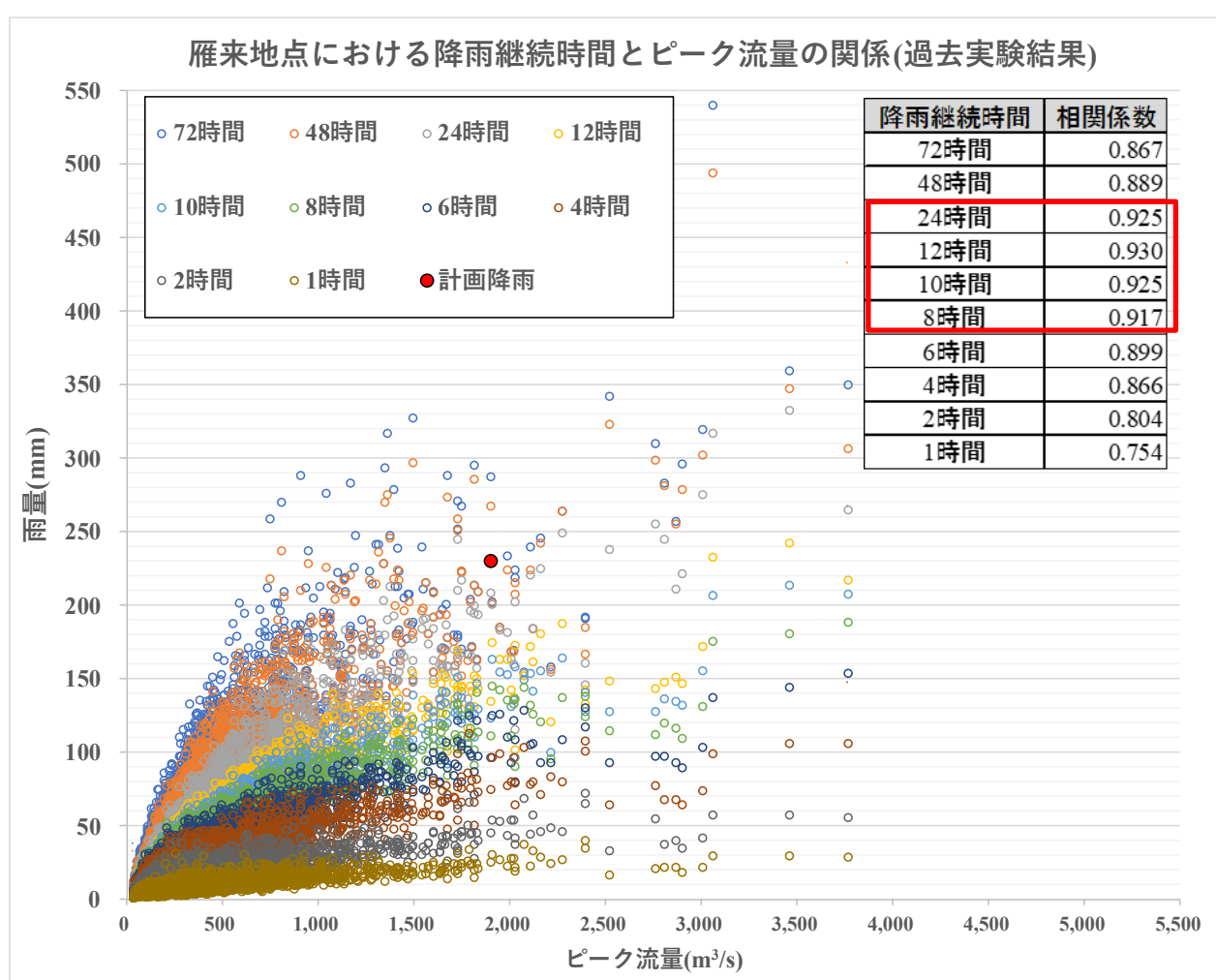


図 3.3.14 過去実験での雁来地点における各降雨継続時間とピーク流量の関係と相関係数

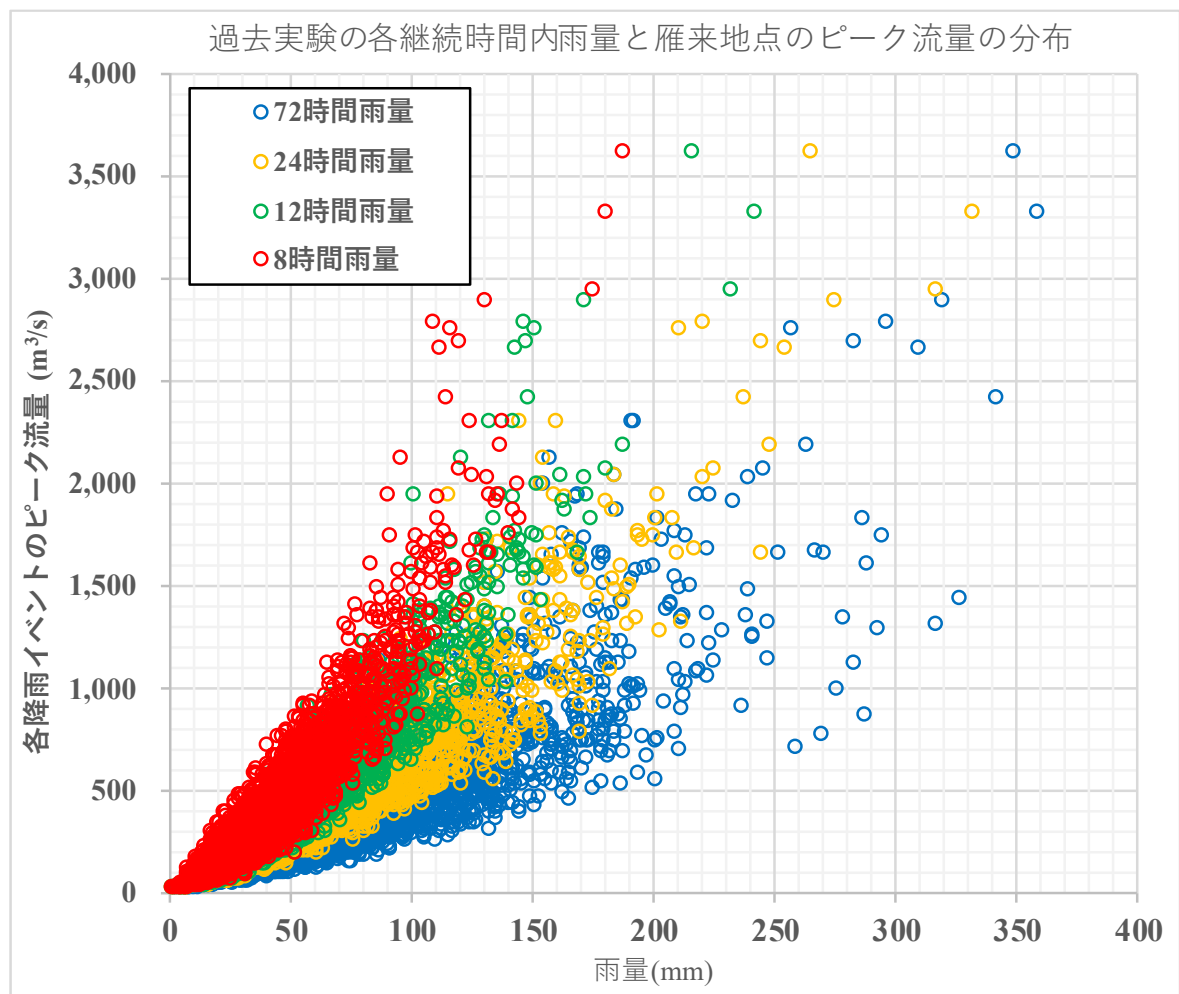


図 3.3.15 過去実験での雁来地点における降雨継続時間内雨量とピーク流量の関係

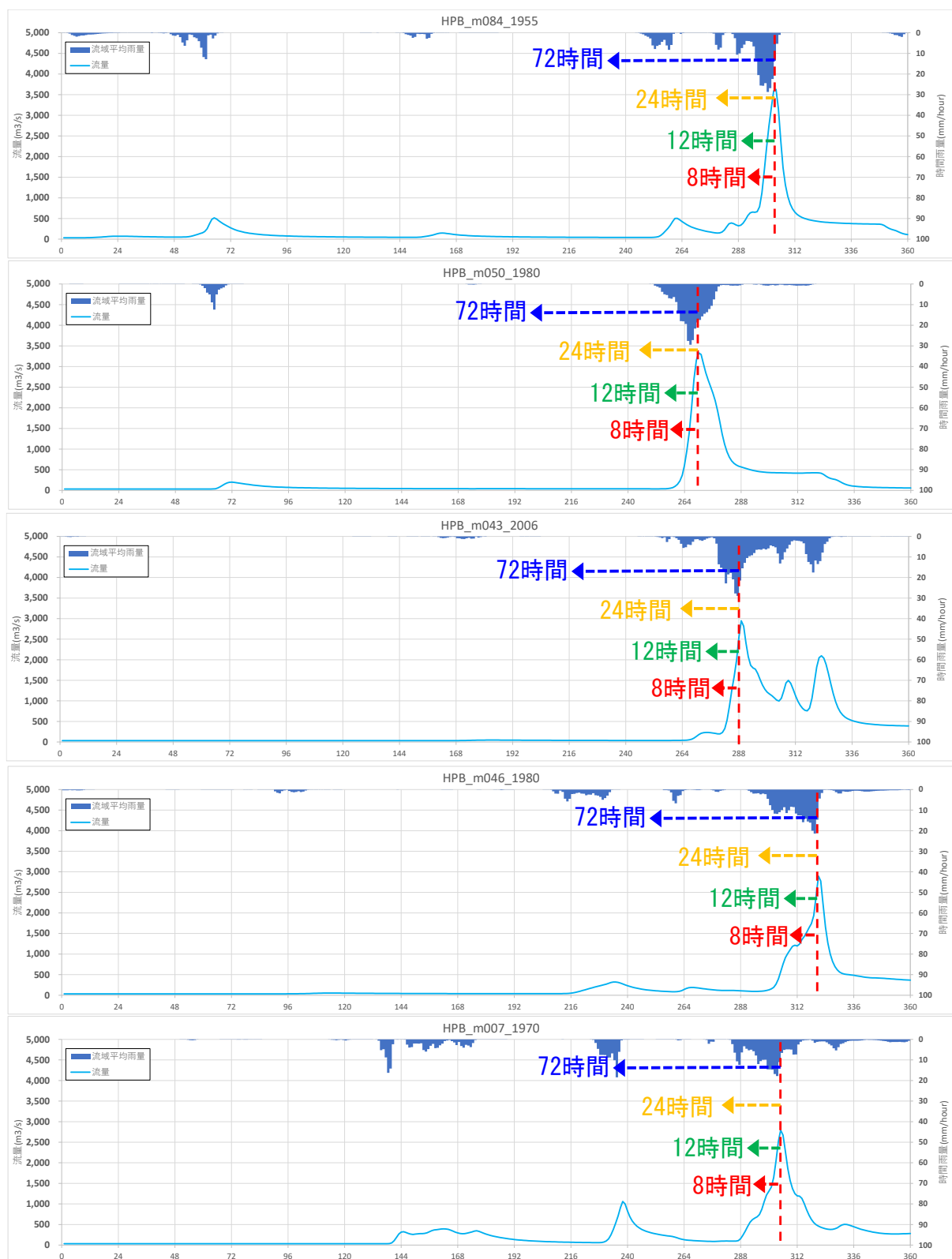


図 3.3.16 各降雨継続時間内の累積降雨量の設定方法

3.3.3 アンサンブルデータを活用した降雨確率の評価

複合確率を算出するために、アンサンブルデータの過去実験を用いて総雨量と洪水到達時間内雨量のそれぞれを確率評価した。図 3.3.17 は、過去実験の総雨量の頻度分布と同総雨量内での洪水到達時間内雨量の最大値と最大値の幅を示す。計画規模降雨相当では洪水到達時間内雨量に約 60mm から約 140mm の幅があり、計画規模降雨以上では総雨量の増加に伴い 8 時間雨量の幅の大きく変化していない。また、図 3.3.17 の計画規模降雨相当の降雨イベントは 12 降雨となっており、総雨量 240mm 内の洪水到達時間内雨量の確率分布を推定することは難しい。そのため、本検討では、洪水の流下時間と多様な降雨分布による洪水流下から設定した 8 時間を対象とした。

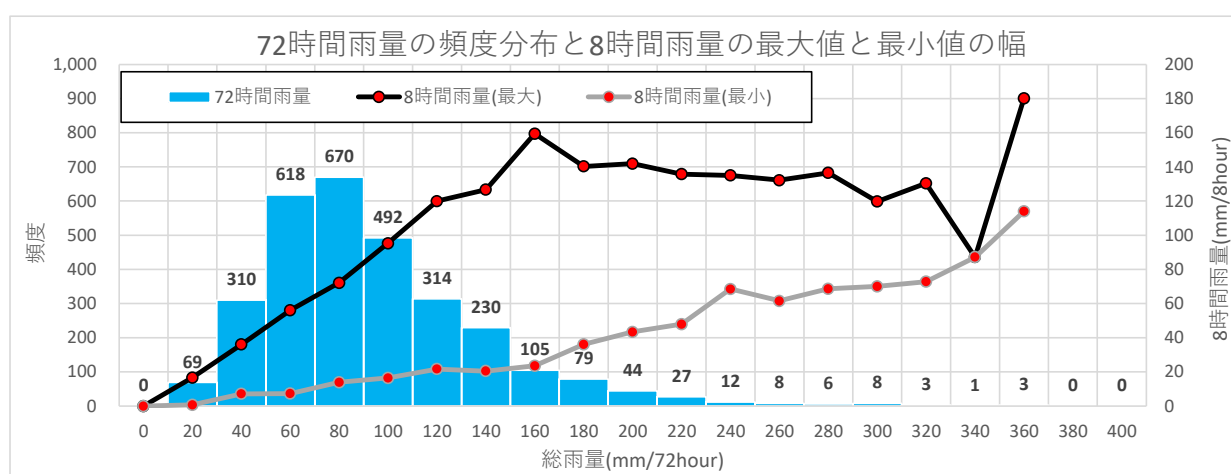


図 3.3.17 過去実験での 72 時間雨量の頻度分布と 8 時間雨量の最大値と最小値の幅

総雨量と洪水到達時間内雨量には、後述の図 3.3.20 に示すように従属関係があることが考えられるが、本研究では計画規模相当の降雨を対象とする点や理解を容易にするために総雨量と洪水到達時間内雨量は独立の事象であると仮定した。各降雨の確率評価は、プロット・ポジション公式の Weibull Plot を用いて、降雨の確率分布は正規分布を仮定して算出した。なお、アンサンブルデータを用いた雨量確率算定時の確率分布の選定は、橋本らの既往検討にあるように Gumbel 分布や GEV 分布などを適合度から選定することもできるが、本検討では相対的な生起確率を評価する点や総雨量と洪水到達時間内雨量を同様の確率分布で評価すべきかどうか等の議論が生じるために正規分布を用いた。図 3.3.18 に過去実験結果を用いた雁来地点上流域の洪水到達時間内雨量を対象とした雨量確率の算定結果を示す。洪水到達時間内の各確率年は、1/10 で 65 mm/8hour となり 1/50 で 103mm/8hour となっている。表-2 に総雨量を対象とした雨量確率の算定結果を示しており、1/50 で 230mm/72hour となり 1/100 で 262 mm/72hour となっている。この各雨量の確率年は、どのような確率評価手法を用いるかで値が変化し幅を有することに留意する必要がある。

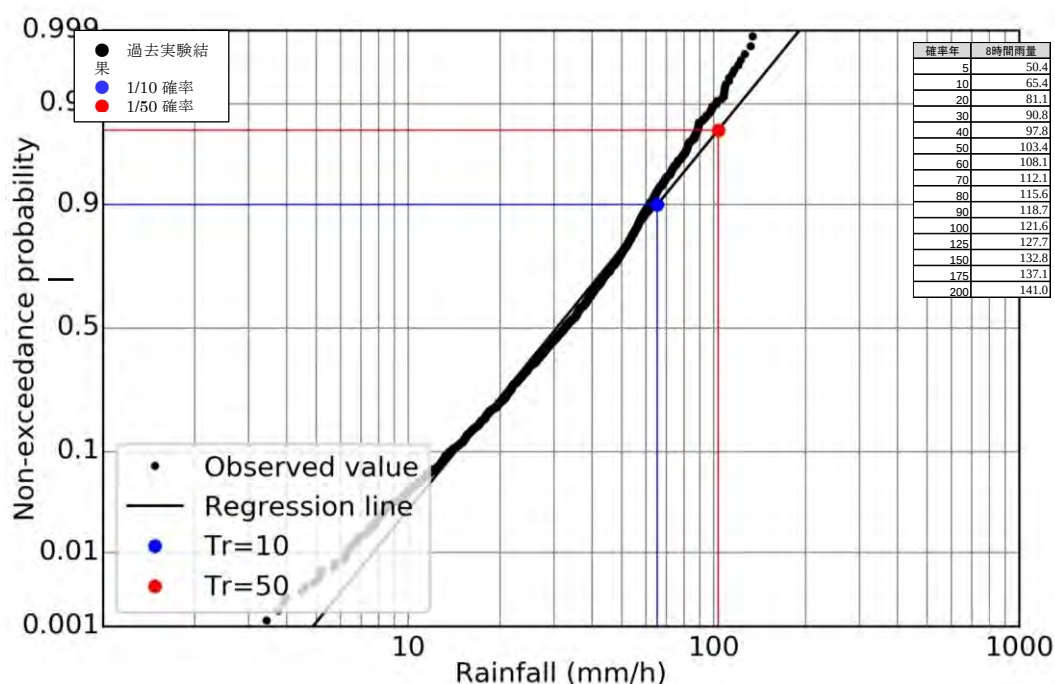


図 3.3.18 豊平川雁来地点の洪水到達時間内雨量(8 時間雨量)を対象とした過去実験結果の雨量確率の算定結果

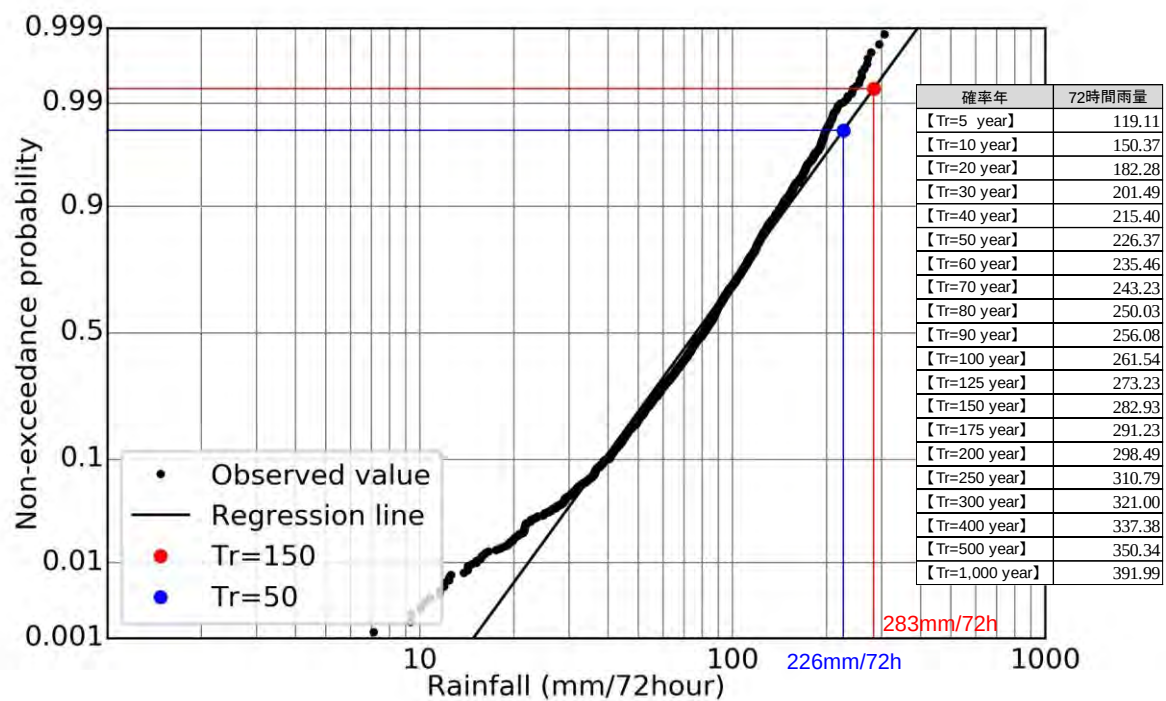


図 3.3.19 豊平川雁来地点の洪水到達時間内雨量(48 時間雨量)を対象とした
過去実験結果の雨量確率の算定結果

表 3.3.6 豊平川の 72 時間雨量を対象とした過去実験結果の雨量確率の算定結果

確率年	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
72時間雨量(mm)	119.1	150.4	182.3	201.5	215.4	226.4	235.5	243.2	250.0	256.1
確率年	100	125	150	175	200	250	300	400	500	1,000
72時間雨量(mm)	261.5	273.2	282.9	291.2	298.5	310.8	321.0	337.4	350.3	392.0

各軸の雨量確率を算出するために、前述の確率評価結果を用いて総雨量と洪水到達時間内雨量を確率図化した。計画規模相当の降雨を対象とする点や理解を容易にするために総雨量と洪水到達時間内雨量は独立の事象であると仮定した。また、各降雨の確率評価は、降雨の確率分布は正規分布を仮定して算出した。

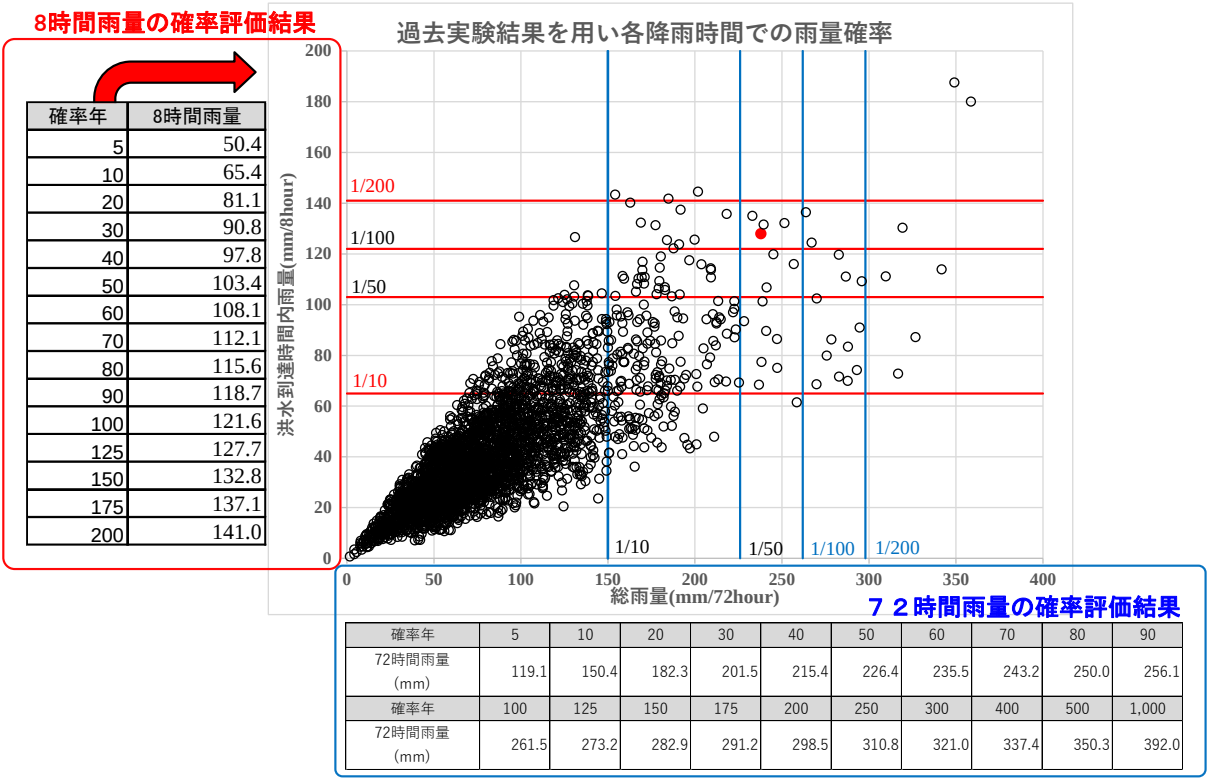


図 3.3.20 総雨量と洪水到達時間内雨量による降雨分布の図化

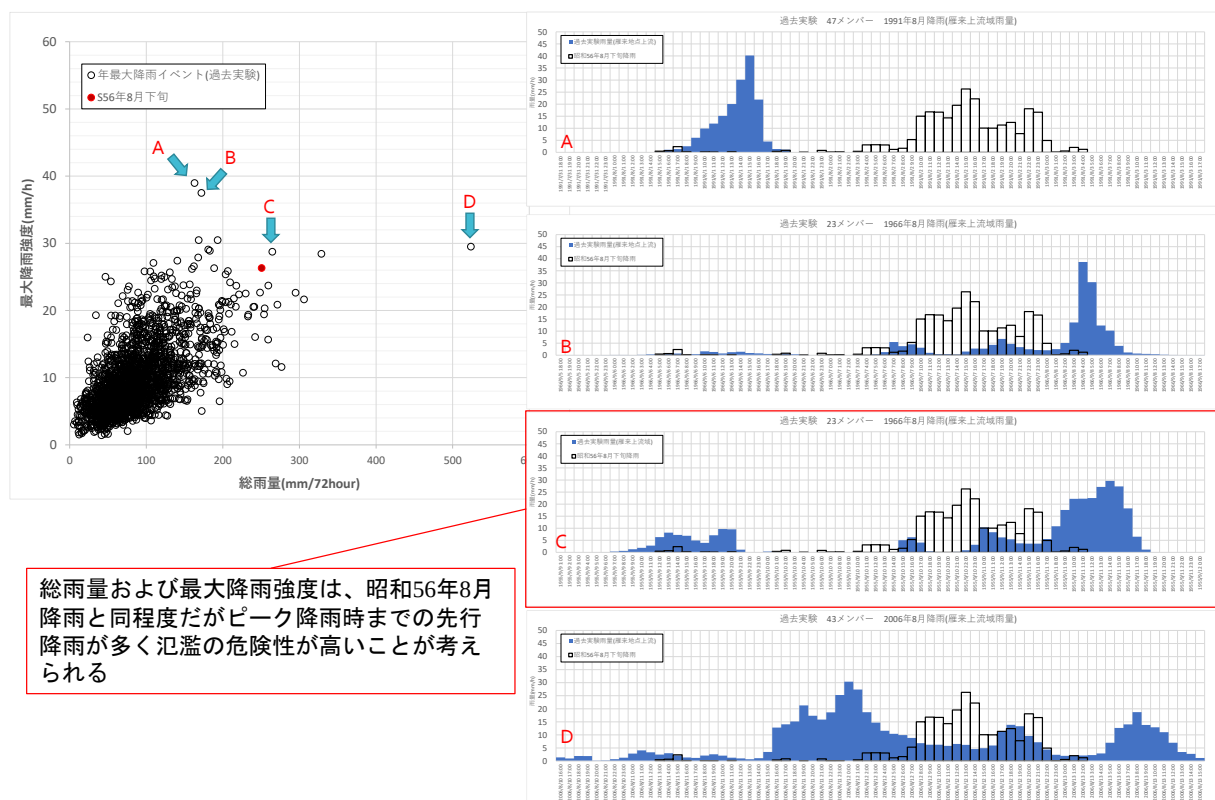


図 3.3.21 降雨波形の一例

3.3.4 複合確率による降雨外力評価方法の提案

本研究では、治水計画で用いられる総雨量と、河川のピーク流量に寄与する洪水到達時間内雨量をそれぞれ確率評価した値を掛け合わせることで複合確率として降雨の生起確率(総雨量の確率×洪水到達時間内雨量の確率)を相対的に評価する。複合確率を豊平川の既往最大洪水を対象に算出すると、総雨量 238mm/72hour で 1/65 の確率評価、洪水到達時間内雨量 128mm/8hour で 1/125 の確率評価となり、既往最大洪水の複合確率は $1/65 \times 1/125$ となる。

既往最大洪水である既往最大洪水の位置(図 3.3.22 の A)は、総雨量および洪水到達時間内雨量ともに複合確率が $1/100 \times 1/100$ の領域に位置している。また、総雨量よりも洪水到達時間内雨量の確率が低くピーク流量に起因する降雨が多いことを示しており、豊平川の計画降雨は総雨量と洪水到達時間内雨量の生起確率のバランスのとれた降雨であると考えられる。また、既往最大洪水(図 3.3.22 の A)の周辺には、同生起確率の降雨が複数存在し、これらを用いることで多様な降雨で治水安全度を検討することが可能である。また、図 3.3.22 の B のように生起確率は $1/15 \times 1/200$ と昭和 56 年 8 月降雨を下回っているがピーク流量は昭和 56 年 8 月降雨と同程度の約 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ となっている。これは、豊平川で生じる可能性のある降雨であり、どのような浸水被害が発生するのかを想定し、事前にソフト・ハード対策が必要である。

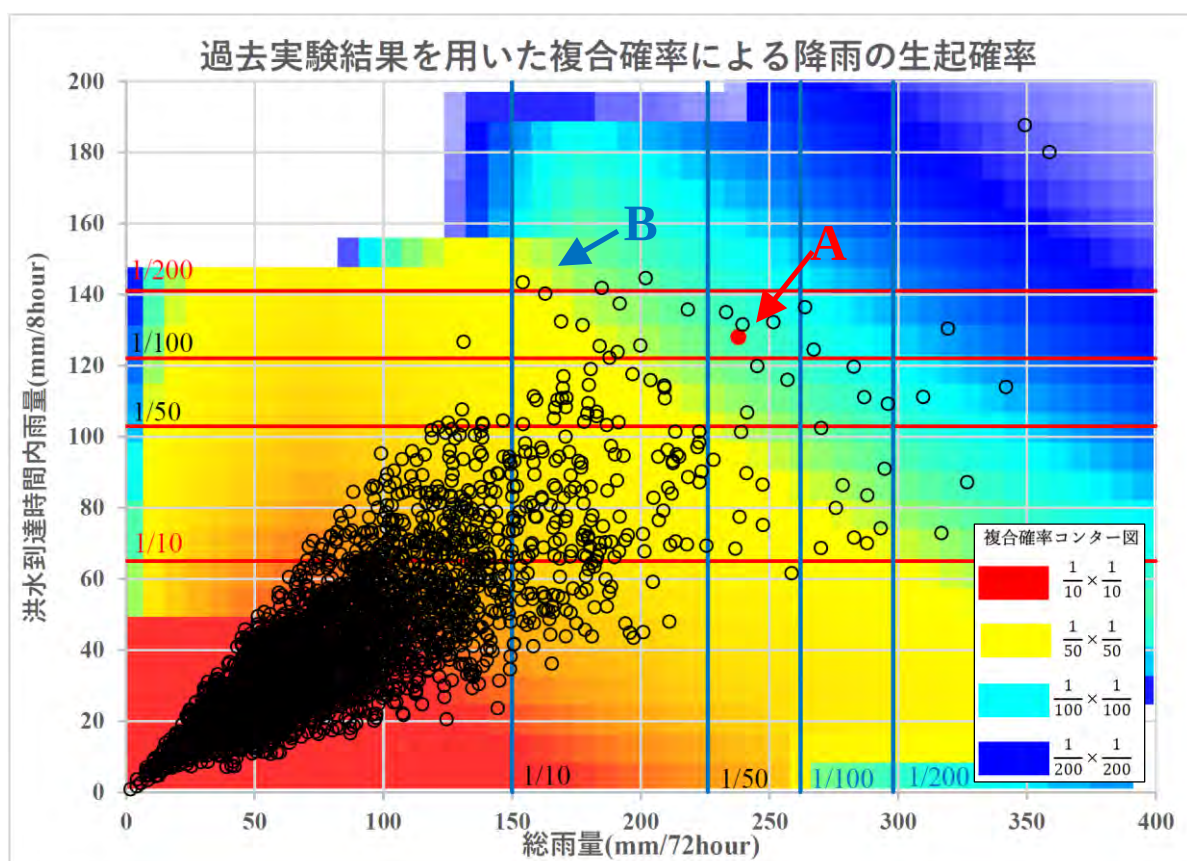


図 3.3.22 豊平川雁来地点の洪水到達時間内雨量(8 時間雨量)を対象とした複合確率

更に、図 3.3.23 は既往最大洪水と同程度の生起確率の降雨の一部を抽出したものであり、2 山波形である既往最大洪水波形が 1 山波形になった波形やシャープ型等の降雨波形が存在し、浸水被害の特性やダム の治水効果の発現状況が異なると考えられる。これらの波形を用いて、現行の治水安全度やダム運用を再評価し、今後の治水計画に活用することが期待できる。そして、各波形を用いた浸水解析で浸水被害を予測し、住民の避難計画やタイムラインの検討にも活用することが期待できる。また、山田・星野ら（2018）の研究成果から将来気候では短時間雨量強度の増加が示されており、短時間雨量の増加による影響を複合確率手法では評価することが可能であると考えられる。

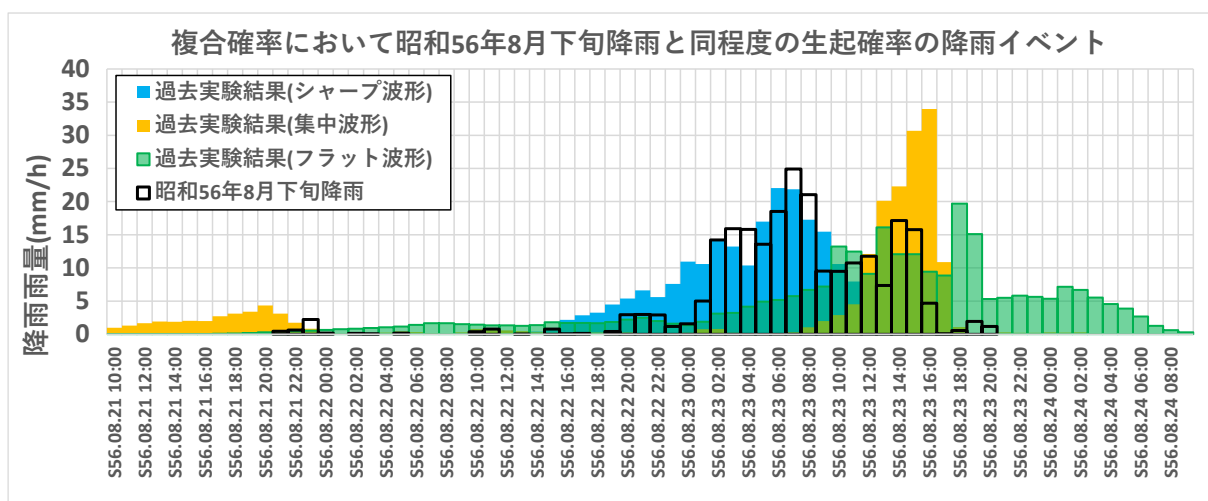


図 3.3.23 既往最大降雨と同程度の生起確率の降雨イベント

3.4 複合確率の今後の課題

総雨量と洪水到達時間内雨量の確率評価法や、総雨量と洪水到達時間内雨量の関係性の扱いは、今後も検討する必要があると考えている。北野ら(2018)は、日雨量と時間雨量の従属関係に注目し 2 変量 GP 分布による生起確率を示しており、本手法において総雨量と洪水到達時間内雨量の従属関係を考慮した生起確率で評価した場合に図 3.3.22 に示した同複合確率域の分布がどのように変化するかを確認する必要があると考えている。

また、本検討では手法の提案のためにアンサンブル降雨予測データは、過去実験のものを使用して確率評価を実施した。将来気候のアンサンブル予測降雨データを使用し、確率を実施することで、面的な降雨特性の変化を可視化して確認することができると考えており、各時間スケールでの降雨外力の変化を分かり易く示すことができると期待している。

第 4 章

内外水同時解析を用いた水害リスク 評価手法の提案

4. 内外水同時解析を用いた水害リスク評価手法の提案

本章では、内外水同時解析を用いた水害リスク評価手法の提案を3つのアプローチから実施している。

【3つの水害リスク評価手法の提案】

①浸水被害に基づく浸水リスクランクの提案

➡ 氾濫解析結果を浸水深や流速等の水理量のみで示すのではなく、浸水被害ベースのリスクランクとして可視化することで水害リスクを可視化する方法を提案

②浸水発生要因に着目した水害リスク評価手法の提案

➡ 浸水解析結果を浸水の発生要因別で可視化することで、各地区や地域の持つ浸水リスクを可視化する手法を開発

③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

➡ 降雨及び流出モデルの不確実性を考慮した氾濫解析を実施し、不確実性の幅を持った浸水リスクマップを作成し、関係機関が浸水対策の方針や優先度を判断する手法を提案

4.1 浸水被害に基づく浸水リスクランクの提案

河川管理者や地方自治体から公表される浸水想定区域図や浸水ハザードマップでは、一般的に最大浸水深を記載することで想定される降雨外力に対する最大浸水深によって浸水リスクを周知している。図 4.1.2 には、本研究で算出した豊平川想定最大規模降雨での最大浸水深図となっている。この最大浸水深図では、各地域や地区がどれほどの浸水深となるかは判断できるが、その浸水深によって引き起こされる浸水被害を住民はすぐに理解することは困難であると考えられる。そこで、本研究では様々な水害リスク指標を統合し、図 4.1.1 浸水による危険度を示したリスクランクを提案した。

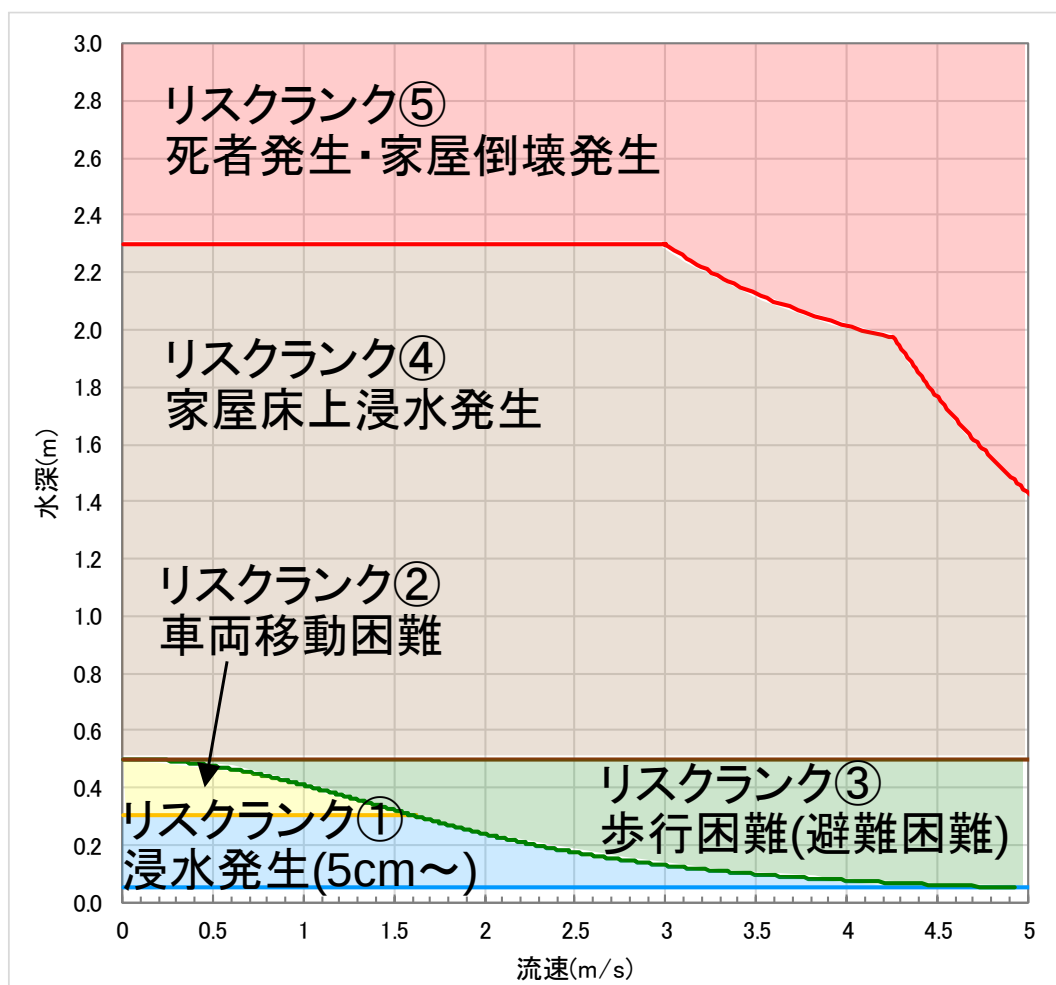


図 4.1.1 浸水による危険度を示したリスクランク

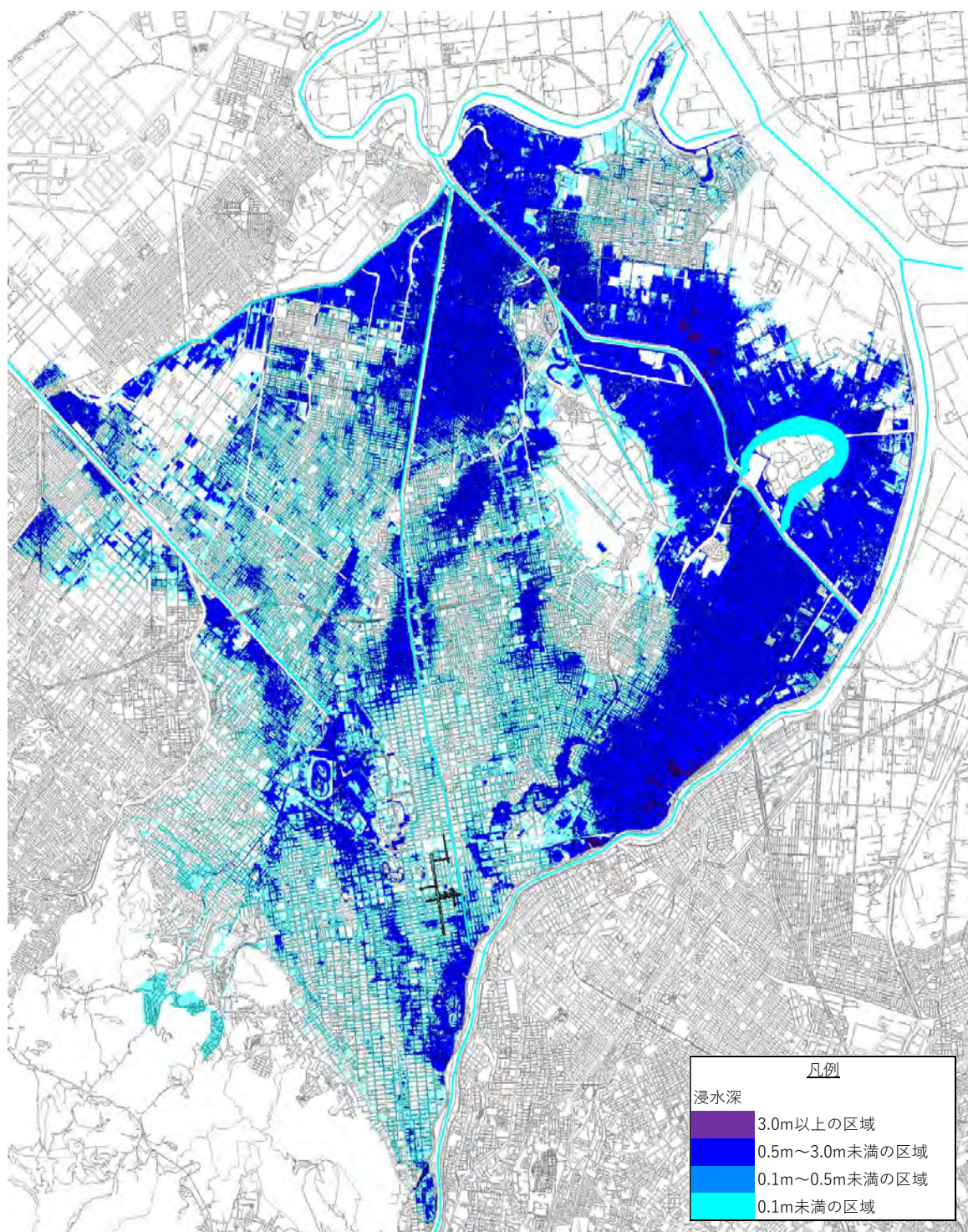


図 4.1.2 豊平川における想定最大規模降雨での浸水域(最大浸水深図)

4.1.1 浸水による危険度を示したリスクランクの設定

浸水危険度は、表 4.1.1 に示す 3 つの観点から下記 4 区分を設定した。以下に、各浸水リスクランクの観点の概要を示す。

【浸水危険度の評価基準（案）】

- ・資産の保護：浸水による被害の変化点の一つとして、浸水深 45cm が床上浸水が生じる値として一般的に使用されている。床上浸水が発生することで、家屋や商業施設への被害が増加するためリスクランクの区分として設定
- ・都市機能の維持：一般的な乗用車が移動困難となる浸水深として 20cm が一般的に使用される。車両による移動（避難）へのもとして被害が発生するためリスクランクの区分として設定
- ・生命の保護：浸水発生時に冠水による人的被害や歩行による避難が困難となる指標として、被害が発生するためリスクランクの区分として設定

表 4.1.1 浸水危険度の評価基準（案）

観 点	地区特性	危険度評価基準
1. 資産の 保護	・ 住宅地 ・ 商業施設	① 浸水深45cm （床上浸水）
2. 都市機能 の維持	・ 業務集積地区 ・ 交通拠点施設 ・ 主要幹線地区	② 浸水深20cm （車両移動困難）
3. 生命の 保護	・ 災害時要援護者施設 ・ アンダーパス等 ・ 地下街	③ 浸水深30cm ④ 流速0.5m/s （歩行困難）

(1) 車両移動困難指標

「水害の被害指標分析の手引き H25.3」から、道路途絶により影響を受ける通行台数等の指標に用いられる浸水深 30cm を設定した。

【分類②】

(4.2) 道路途絶により影響を受ける通行台数

途絶道路の通行台数の総和を推計する。

【推計手法】

道路途絶により影響を受ける通行台数

$$= \Sigma \{ (\text{途絶道路区間の平日 24 時間交通量(台数)} \times t_1/24) \}$$

t_1 : 道路が途絶する期間 (浸水期間+復旧期間)

【推計の考え方】

道路が途絶することによる影響は、市街地における面的な交通機能喪失や、幹線道路途絶による広域的な影響、地域間の重要な連絡道の被災等、地域の道路事情や氾濫特性により様々である。浸水する路線のうち地域にとっての重要性を勘案し、道路の抽出を行い、途絶道路の平日 24 時間交通量 (台数) を、自動車の通行に支障が生じる浸水深 30cm 以上となる途絶期間で按分した台数の総和を影響台数として推計する。

しかし、盛土構造や高架等により道路が高い場合については、管理者等への確認を行い、個別に設定することが望ましい。

については、浸水期間と復旧期間の日数の合計にて設定することが望ましいが、復旧期間の設定が困難と考えられるため、当面は浸水期間のみで設定する。

<浸水による道路途絶の考え方>

機能低下する条件は、『(4.1) 途絶する主要な道路』と同様に、浸水深 30cm を閾値として設定することを原則とする。

<浸水深と自動車通行との関係>

10 [cm] : 乗用車のブレーキの効きが悪くなる

20 [cm] : 道路管理者によるアンダーパス等の通行止め基準

30 [cm] : 自治体のバス運行停止基準

乗用車の排気管やトランスミッション等が浸水

60 [cm] : J A F の実験でセダン、S U V とともに走行不可⁸¹⁾

<参照データ>

道路の交通量の情報は、国土交通省『道路交通センサス』より取得する。

※出典：水害の被害指標分析の手引き H25.3

図 4.1.3 車両移動困難の指標

(2) 歩行困難指標

歩行困難指標は、京都大学の戸田・関西大学の大西ら(2011)が行った実物大模型実験をもとに設定した。実験の概要を以下にまとめた。この実験により、避難困難度の基準として図 4.1.5 に示す式が提案されている。

【研究の概要】

地下空間浸水時の危険性や避難に関する模型実験、数値シミュレーションを実施し、地上への連絡路となる階段部、平坦部における水中歩行の危険性について評価

【実験条件】

場 所：実物大模型実験（京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー）

水の流れ：高水槽から越流した水が、階段を流下し通路部を流れ、地下に落ちる構造になっている。階段最上段の水深を地上水深 H とし、ポンプにより、ここでの水位が一定になるように水槽に水を供給している。実験では、地上水位 H を 10cm ごとに変化させ、流速と水深の測定および避難体験実験を実施した。

被験者：男性 51 名、女性 6 名の 57 名を対象。

年齢は 20 歳代が中心。

測定項目：避難開始（平坦部の橋）から階段 1 段目に足が到着するまでを通路部の歩行時間とし、その後、階段最上段に足が到着するまでを階段部の歩行時間としている（すなわち、流れに逆らう方向に歩行している）。実験中は通路部の流速，水深を計測している。

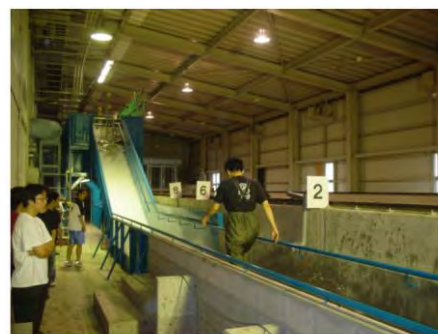


写真-1 避難体験実験の様子

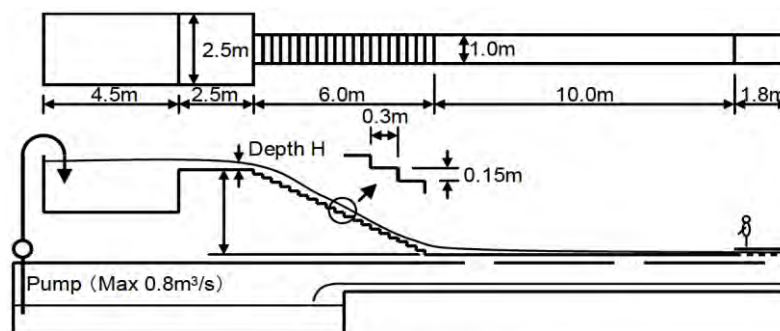


図 4.1.4 避難困難度を評価するための実物大模型実験

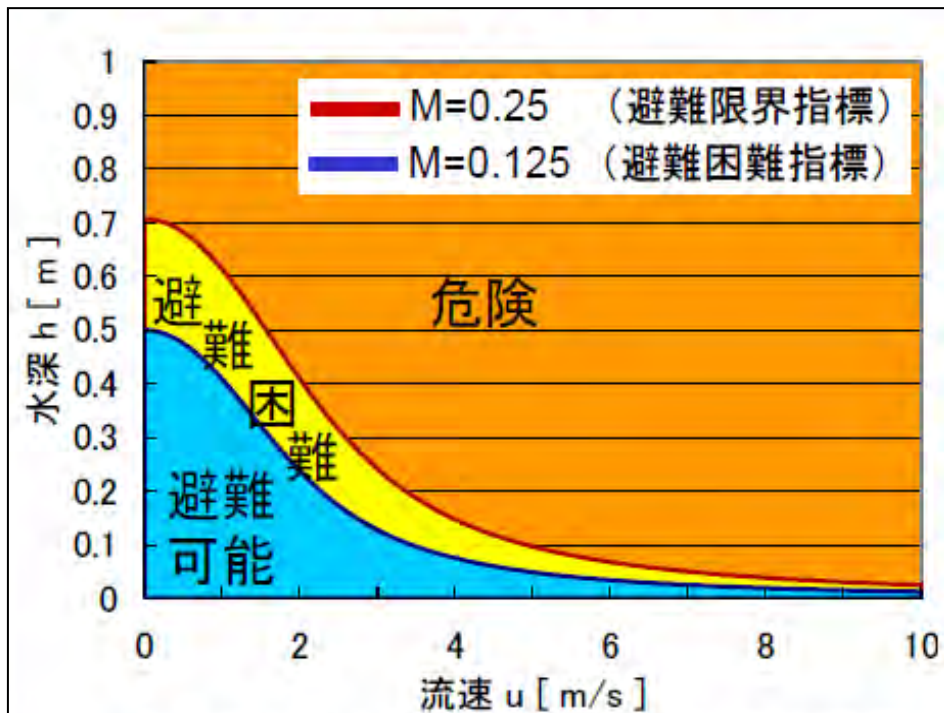


図 4.1.5 成人男性が避難困難及び避難限界となる際の水深と流速の関係

出典)「地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用 (2008 年 2 月)」, p.843 より抜粋

$$\ast M = u^2 h / g + h^2 / 2$$

(3) 家屋の床上浸水の指標

家屋の床上浸水の指標は、「治水経済調査マニュアル（案）平成 17 年 4 月」をもとに、50cm とした。

4.3.1 家屋被害

メッシュ内の階数分布を用いて補正した資産額に浸水深に応じた被害率を乗じて家屋被害額を算定すること。

〔解説〕

4.2.1 項で求めた家屋資産をメッシュ内の階数分布を用いて補正し、表-4.2 の被害率を乗じて家屋被害額を算定する。

補正後家屋資産額×被害率

表-4.2 浸水深別被害率

浸水深 地盤勾配	床下	床上					土砂堆積（床上）	
		50cm 未満	50～ 99	100～ 199	200～ 299	300cm 以上	50cm 未満	50cm 以上
A グループ	0.032	0.092	0.119	0.266	0.580	0.834	0.43	0.785
B グループ	0.044	0.126	0.176	0.343	0.647	0.870		
C グループ	0.050	0.144	0.205	0.382	0.681	0.888		

A：1/1000 未満、B：1/1000～1/500、C：1/500 以上

注：1．平成 5 年～平成 8 年の「水害被害実態調査」により求められた被害率。（ただし、土砂堆積は従来の被害率）

2．家屋の全半壊についても考慮した数値である。

※出典：治水経済調査マニュアル H17.4

図 4.1.6 床上浸水発生リスクの指標

(4) 死者・家屋倒壊発生指標

死者・家屋倒壊発生指標は、「水害の被害指標分析の手引き H25.3」,「洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版） H27.7」を参考に設定した。

死者発生の指標は、「水害の被害指標分析の手引き H25.3」において、1階床高が50cm, 1階床高から2階床高までが2.7mとされている。また、65歳以上の災害時要援護者の危険水位帯は水深1.8m以上となっている。ここでは、1階建家屋における災害時要援護者の被災を考え、0.5m+1.8mとした浸水深2.3mを死者発生リスクが発生する指標として用いた。

家屋倒壊発生の指標は、「洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版） H27.7」において、図4.1.7のように水深と流速の関係で示されている。

(5) 建物の倒壊等条件

氾濫による家屋倒壊等の要因としては、倒壊・滑動・転倒が考えられる。家屋倒壊等境界の算出方法の一例として、氾濫流が通過する過程で家屋が倒壊等に至る状況を想定し、木造2階建て家屋について倒壊等境界を試算した結果を図-4.2-2に示す。氾濫流による倒壊等基準となる倒壊と滑動について示しているが、あくまでもモデル的な家屋、荷重条件等を想定しての試算結果であることに留意されたい。試算の詳細は＜参考資料1＞3.流体力による建物の倒壊等条件を参照されたい。

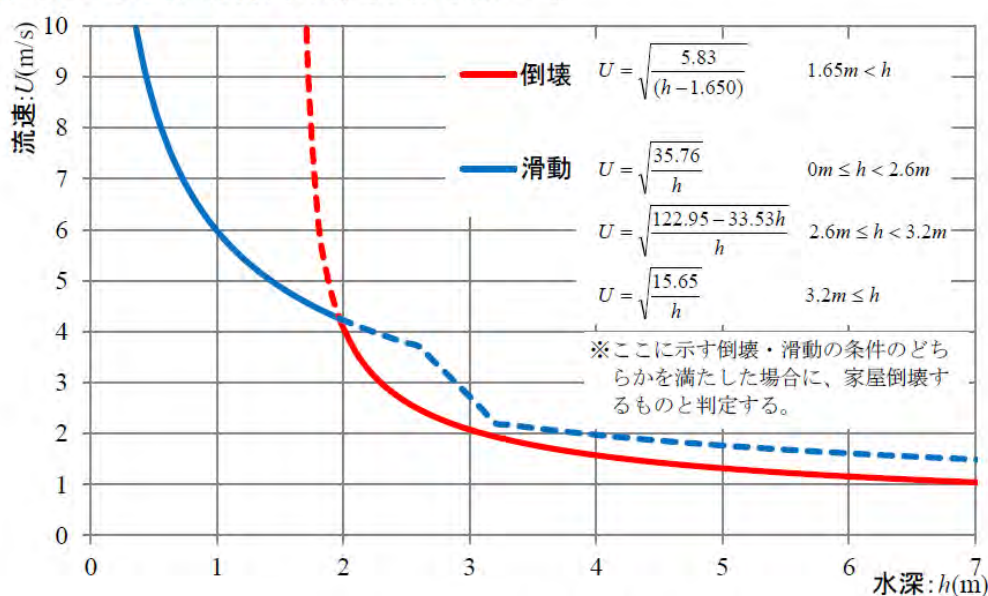
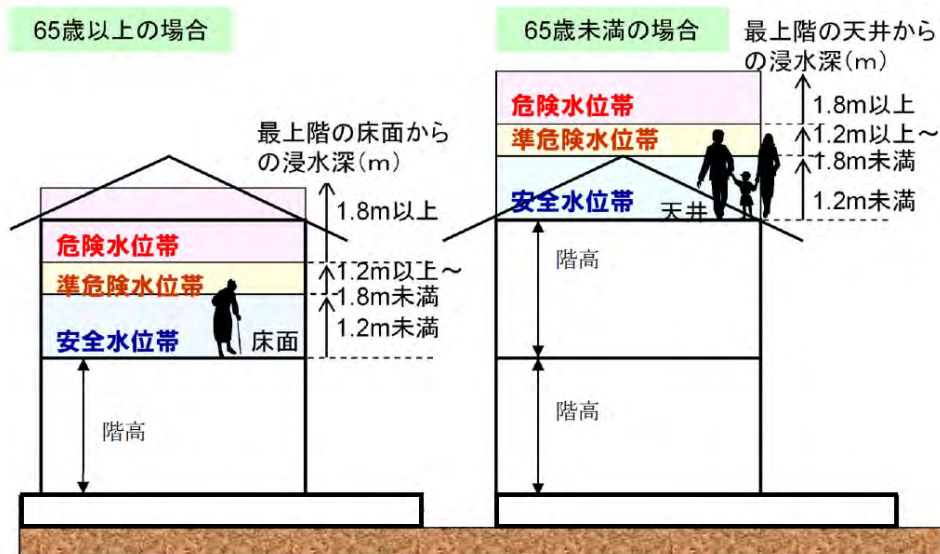


図-4.2-2 木造家屋の倒壊等境界の試算例

※出典：洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版） H27.7

図 4.1.7 家屋倒壊発生リスクの指標

<LIFESim モデルの適用>⁵²⁾⁵³⁾



<浸水深に応じた死亡率 s の分類>

	死亡率 (%)
危険水位帯	91.75
準危険水位帯	12.00
安全水位帯	0.023

<1階床高の設定>

LIFESim モデルでは2feet (約60cm) と設定されているが、本手引においては下記により50cm と設定する。

- ・床の高さは、直下の地面からその床の上面まで45cm以上とすることが定められていること⁵⁴⁾
- ・基礎高は実態として30～40cmが34.6%、40cm以上が56.2%⁵⁵⁾、平均約44cm⁵⁶⁾となっており、床高はこれに土台の高さ、床厚が加わること

<階高の設定>

LIFESim モデルでは1階の床から2階の床までを約2.7m と設定している。下記により、我が国においても天井高さに梁高、床厚を加えると約2.7～2.9m と考えられる⁵⁰⁾ことから、2.7m と設定する。

- ・居室の天井高さは、居室の床面から2.1m以上と定められており⁵¹⁾、天井の上の梁高、床厚を加えると最低でも2.5m以上であること

※出典：水害の被害指標分析の手引き H25.3

図 4.1.8 死者発生リスクの指標

(5) 各種指標を統合した評価指標の設定

前述の各種指標から流速～水深の関係をグラフ化すると図 4.1.9 のようになる。各種指標の境界線で区分される領域をすべて網羅すると指標が多くなり複雑化するため、リスクランクを図 4.1.10 のように設定した。

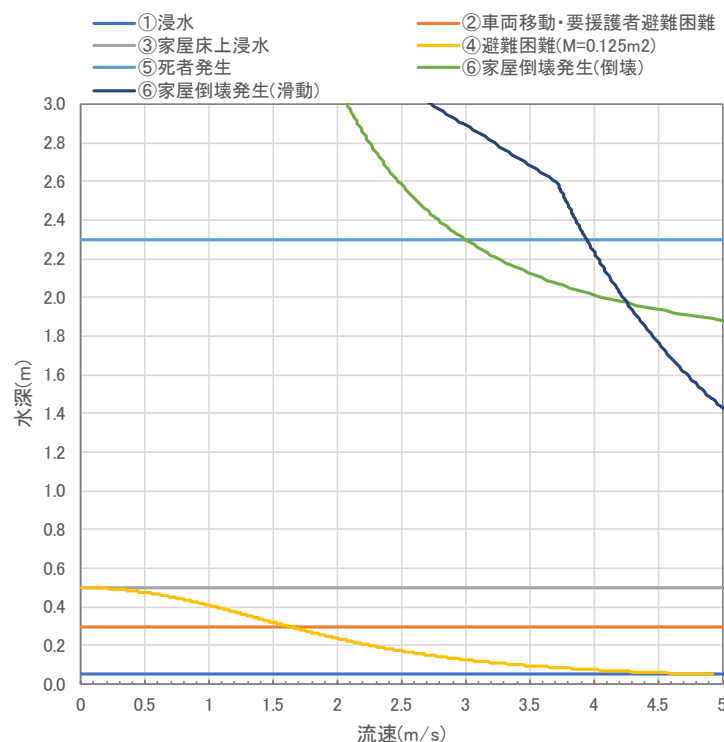


図 4.1.9 各種指標の流速～水位関係

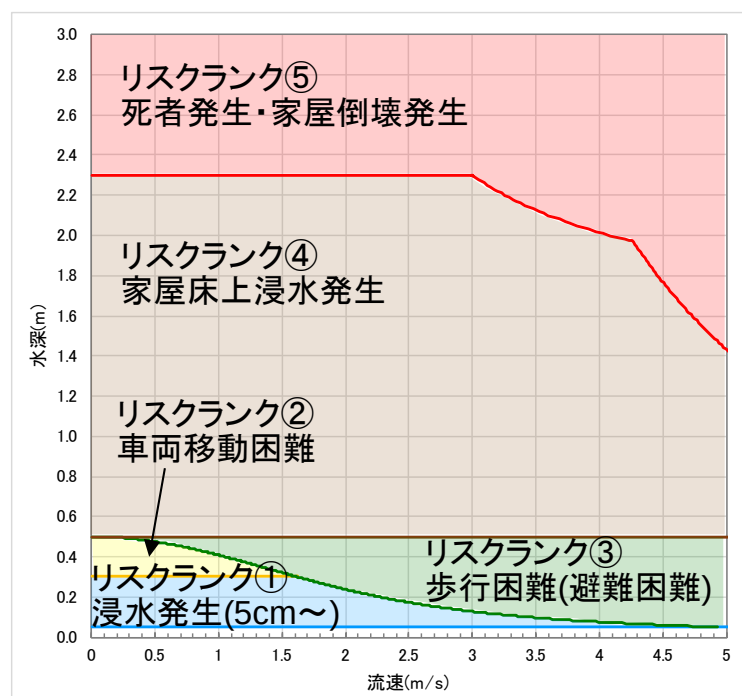


図 4.1.10 各種指標を統合したリスクランクの設定

4.1.2 浸水リスクランクを用いた時空間的な浸水リスク評価

前述の浸水リスクランクを用いて、浸水被害の時空間的な浸水リスク評価を実施した。想定最大規模等の大規模洪水時は、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、浸水リスクランクを活用したに示すリスク評価法を提案した。図 4.1.11 に当手法の具体的な検討方法を示す。

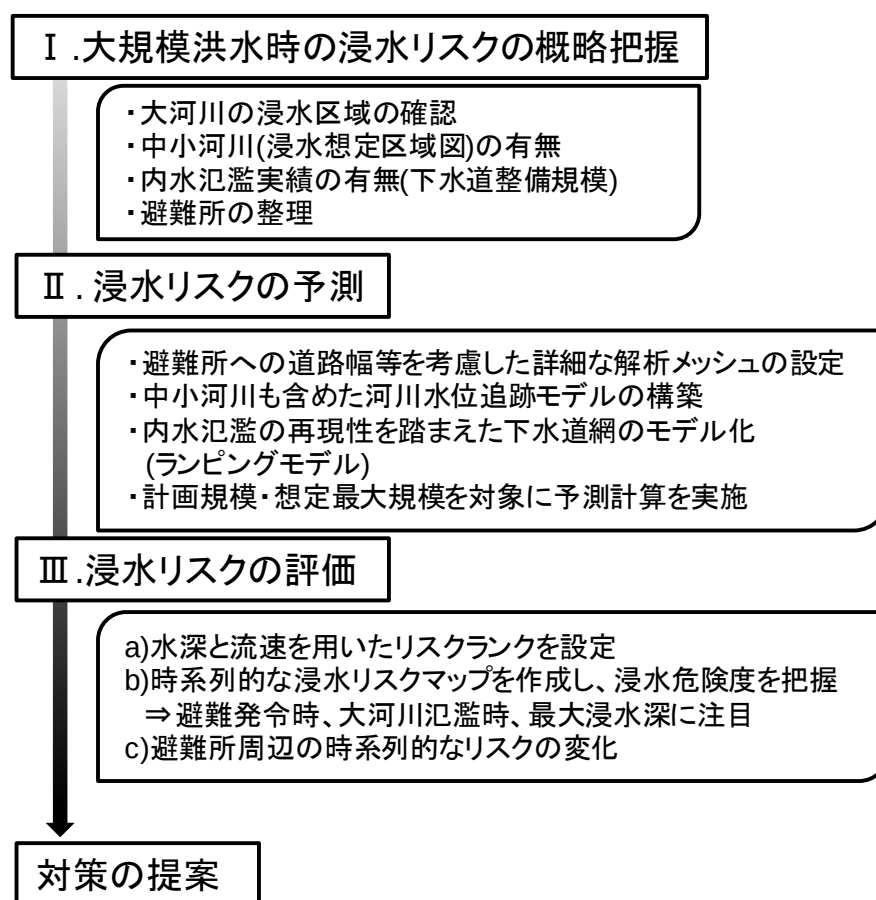


図 4.1.11 大規模洪水時における浸水リスクランクを活用した評価手法

(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。

a) 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。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。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、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。

(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管路を追加することが効率的であると考えられる。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。本検討で使用した解析モデルについては、第 2 章にて詳述している。ここでは、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。

a) 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 4.1.12 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。

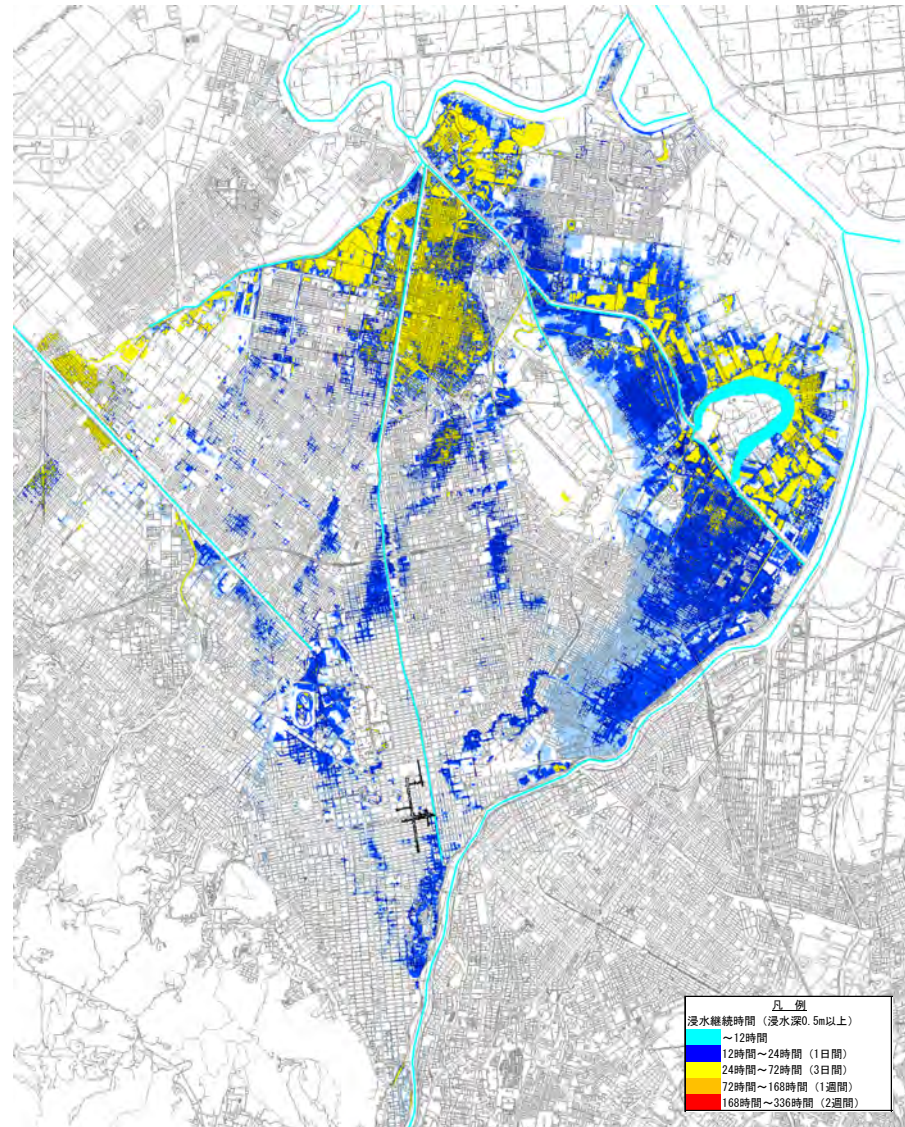
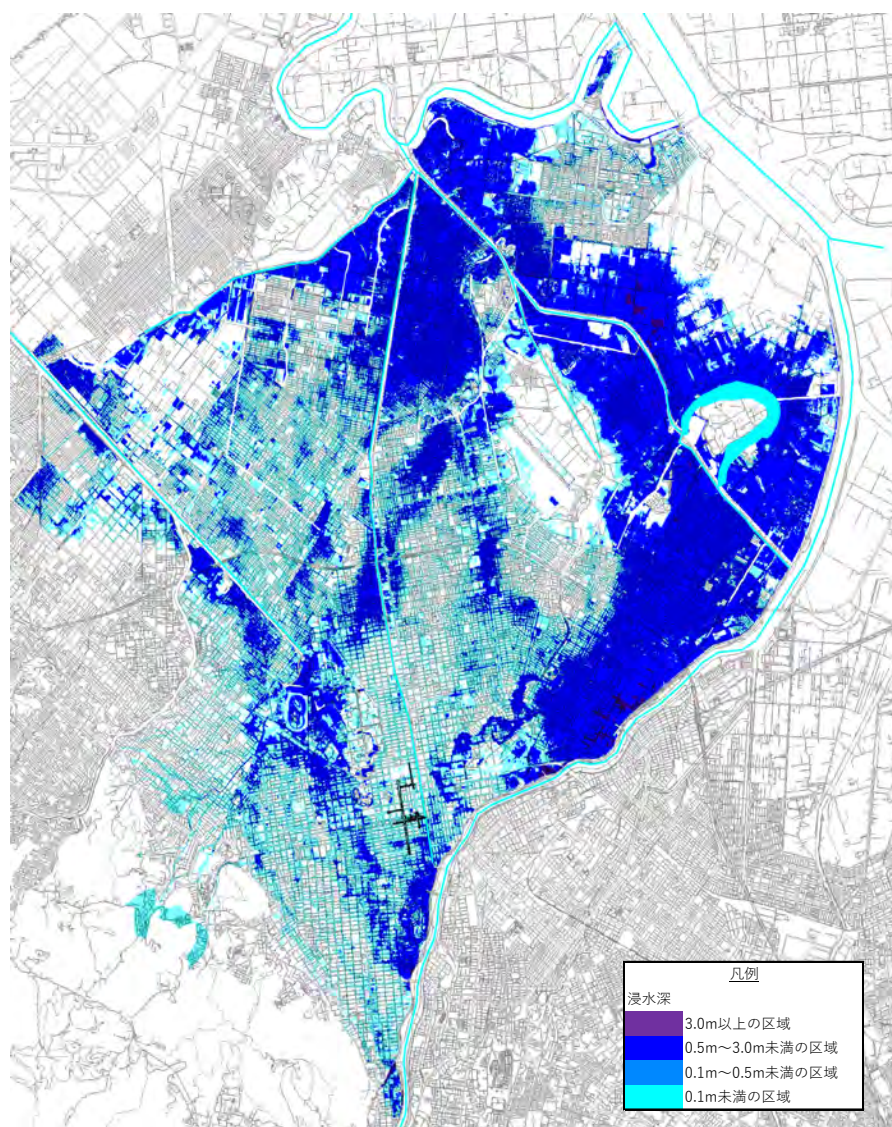


図 4.1.12 想定最大規模での浸水域(最大浸水深図と浸水継続時間)

(3) 浸水リスク評価

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。

①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。

②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・東北豪雨災害時で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。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。

③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。

a) 想定最大規模降雨時の豊平川左岸域での浸水リスクランク評価

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。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 4.1.14 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 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。

豊平川下流域では、図 4.1.13 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。

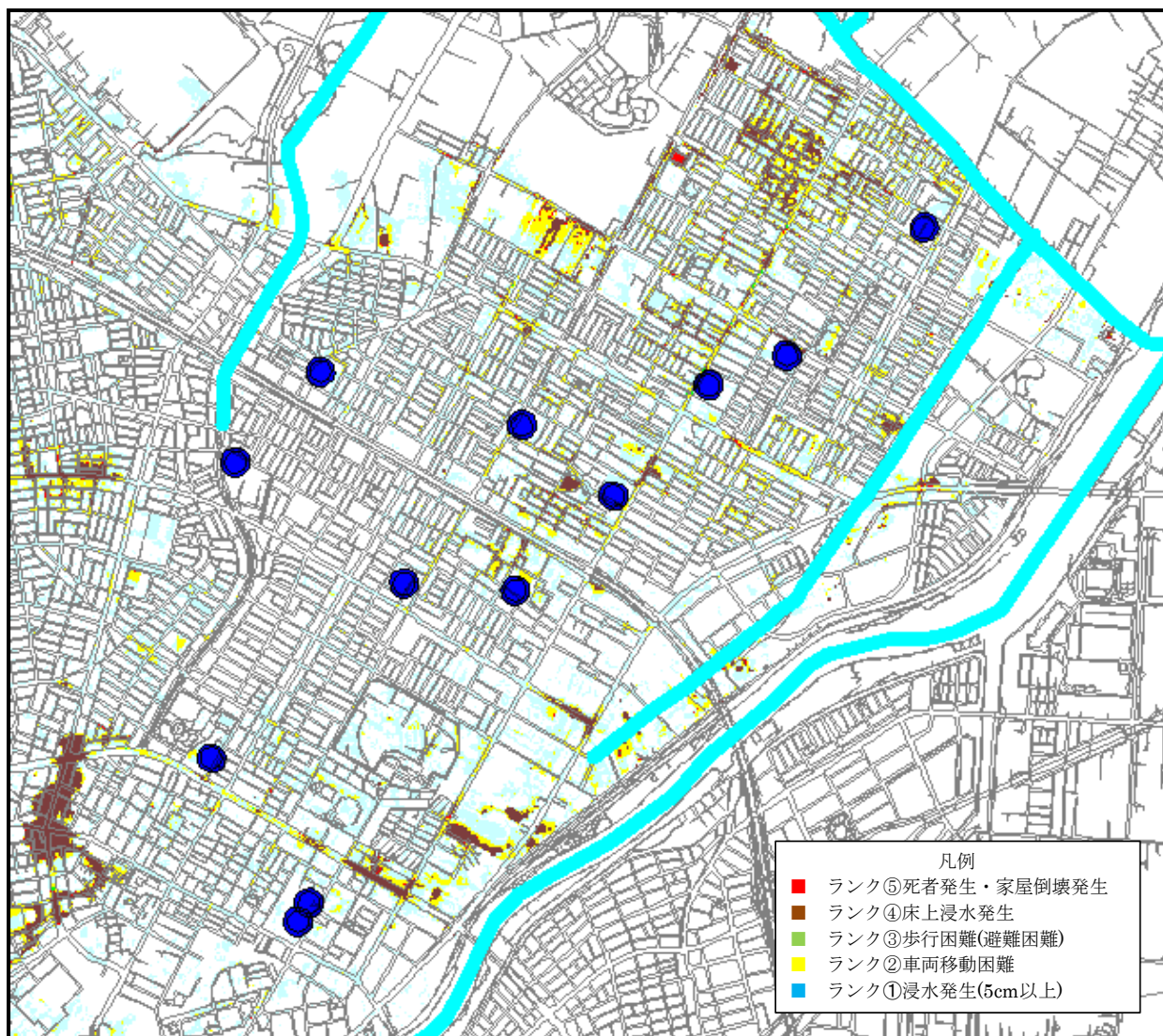


図 4.1.13 豊平川下流域の浸水リスクの発生状況

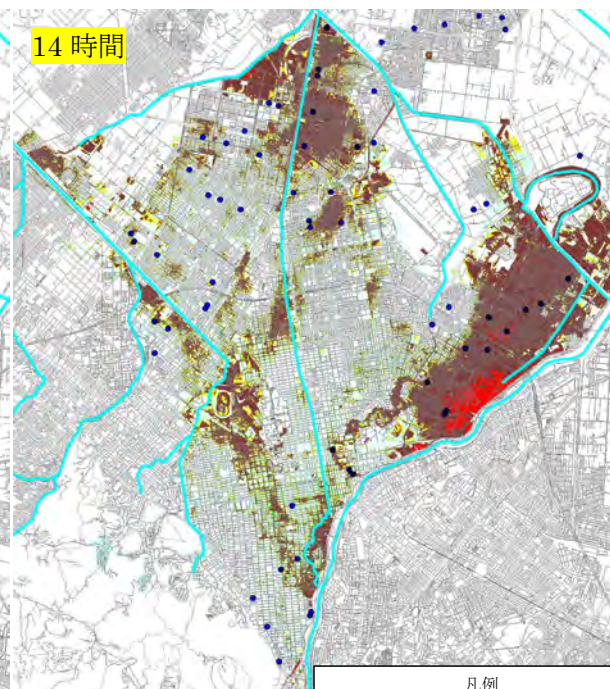
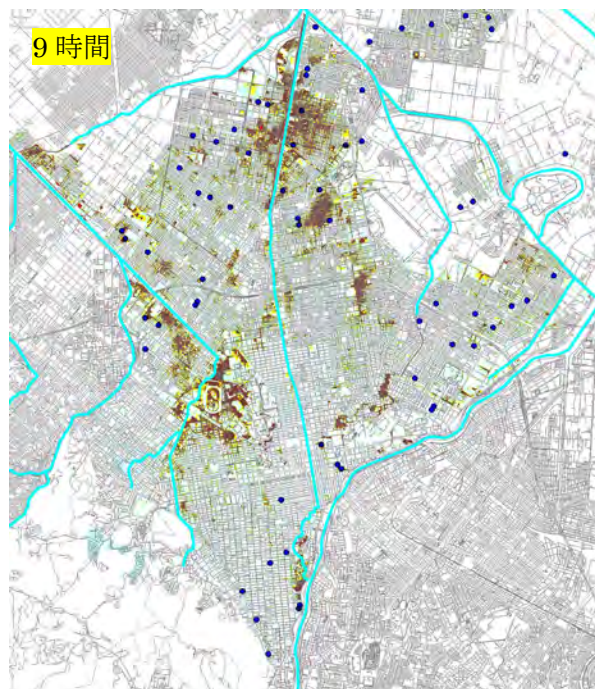
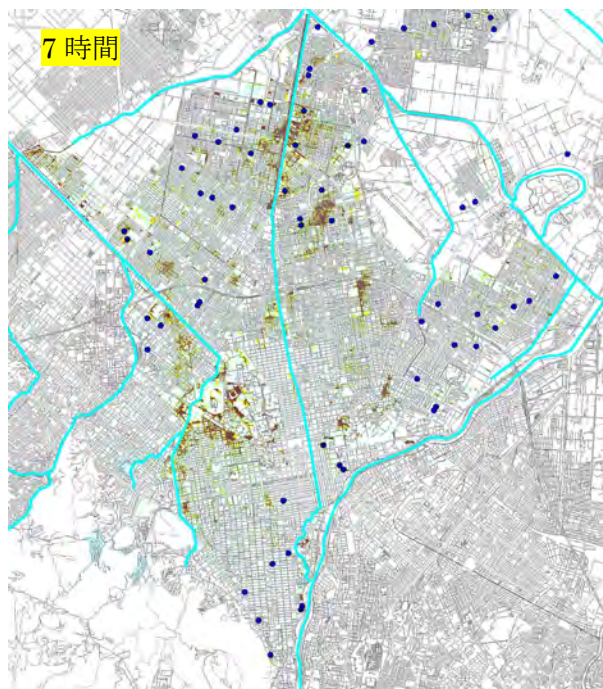
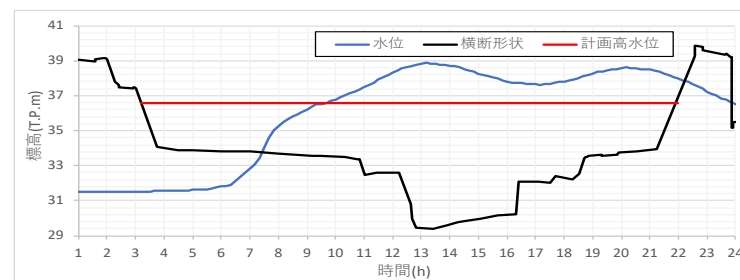
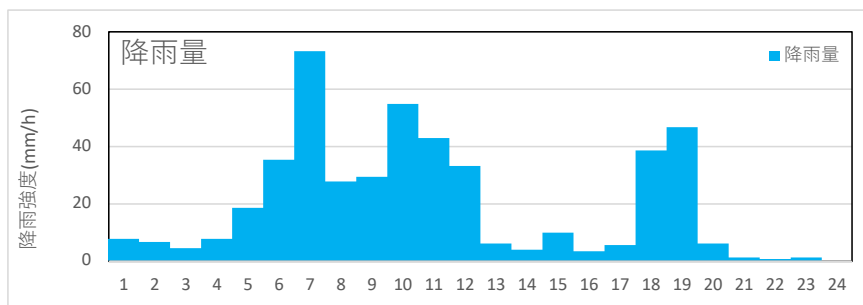


図 4.1.14 時空間的な浸水リスクマップの変化

- 凡例
- ランク⑤死者発生・家屋倒壊発生
 - ランク④床上浸水発生
 - ランク③歩行困難(避難困難)
 - ランク②車両移動困難
 - ランク①浸水発生(5cm以上)

(4) リスクランクによる浸水リスク評価を踏まえた対策案の提案

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 4.1.15 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。

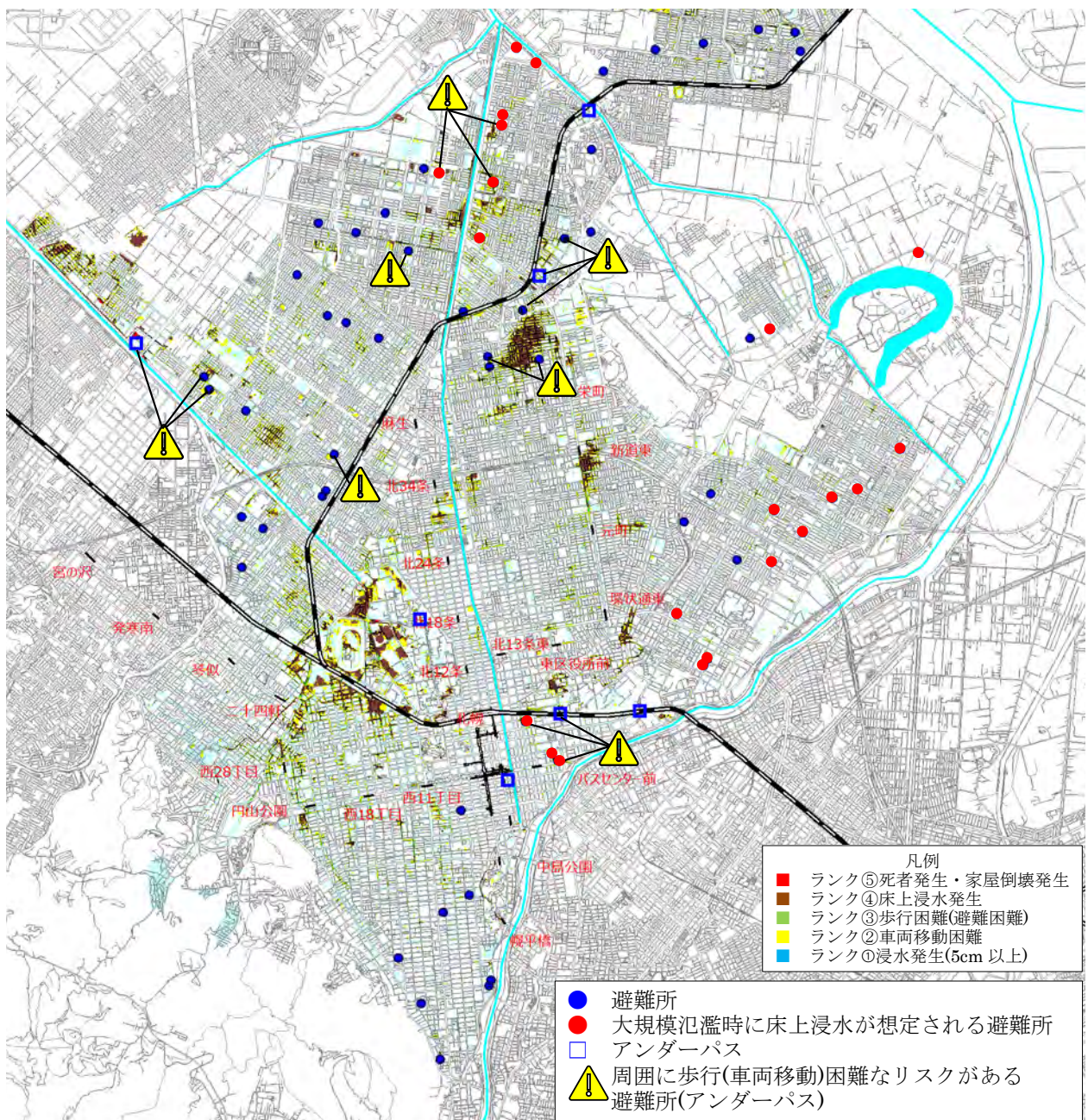


図 4.1.15 リスクマップの作成例

4.2 浸水発生要因に着目した水害リスク評価手法の提案

河川が貫流し下水道が整備された地域では、豪雨時に内水氾濫と外水氾濫による浸水被害が複合的に生じることが想定される。内水氾濫と外水氾濫は、一般的に下水道と河川の対象とする降雨の時間スケールや管理者が異なることから個別に浸水想定区域図が検討されている。

内水氾濫と外水氾濫が想定される地域の浸水域を比較すると、河川堤防の決壊を想定する外水氾濫の浸水域が、内水氾濫の浸水域を包絡することが多い。そのため、外水氾濫による浸水被害が注目されることが多いが、前述の水害リスクの予測でも、洪水時に河川堤防の決壊前に避難所周辺で発生する内水氾濫が、住民の避難行動に影響を及ぼす可能性を示した。

本研究では、内外水同時解析を実施しその解析結果を水害リスクの評価方法として活用する手法を「4.2 浸水発生要因に着目した水害リスク評価手法」として提案（開発）した。

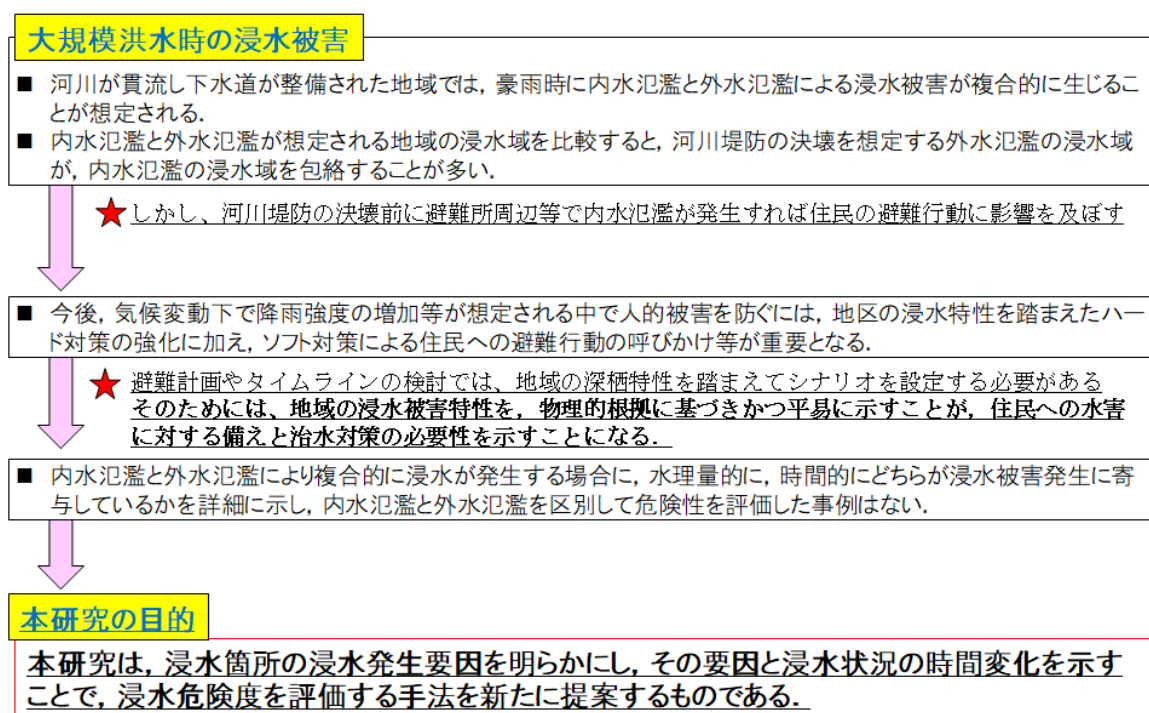


図 4.2.1 浸水発生要因に着目した水害リスク評価手法の提案

4.2.1 浸水発生要因に着目したリスク評価手法の提案の背景

内水氾濫と外水氾濫の両方が想定される地区では、降雨条件(降雨量、降雨波形等)や河川の決壊条件(決壊地点、決壊水位等)によって浸水被害特性が時空間的に変化する。近年、既存のハード対策では防ぎきれないような計画規模を超過する降雨が発生し、甚大な浸水被害(人的被害)が生じている。今後、気候変動下で降雨強度の増加等が想定される中で人的被害を防ぐには、地区の浸水特性を踏まえたハード対策の強化に加え、ソフト対策による住民への避難行動の呼びかけ等が重要となる。そのためには、地域の浸水被害特性を、物理的根拠に基づきかつ平易に示すことが、住民への水害に対する備えと治水対策の必要性を示すことになる。しかしながら、河川と下水道を一体として扱い解析し、内水氾濫と外水氾濫の両方を含めて浸水被害特性を検討した事例は多くない。特に、内水氾濫と外水氾濫により複合的に浸水が発生する場合に、水理量的に、時間的にどちらが浸水被害発生に寄与しているかを詳細に示し、内水氾濫と外水氾濫を区別して危険性を評価した事例はない。本研究は、浸水箇所の浸水発生要因を明らかにし、その要因と浸水状況の時間変化を示すことで、浸水危険度を評価する手法を新たに提案するものである。

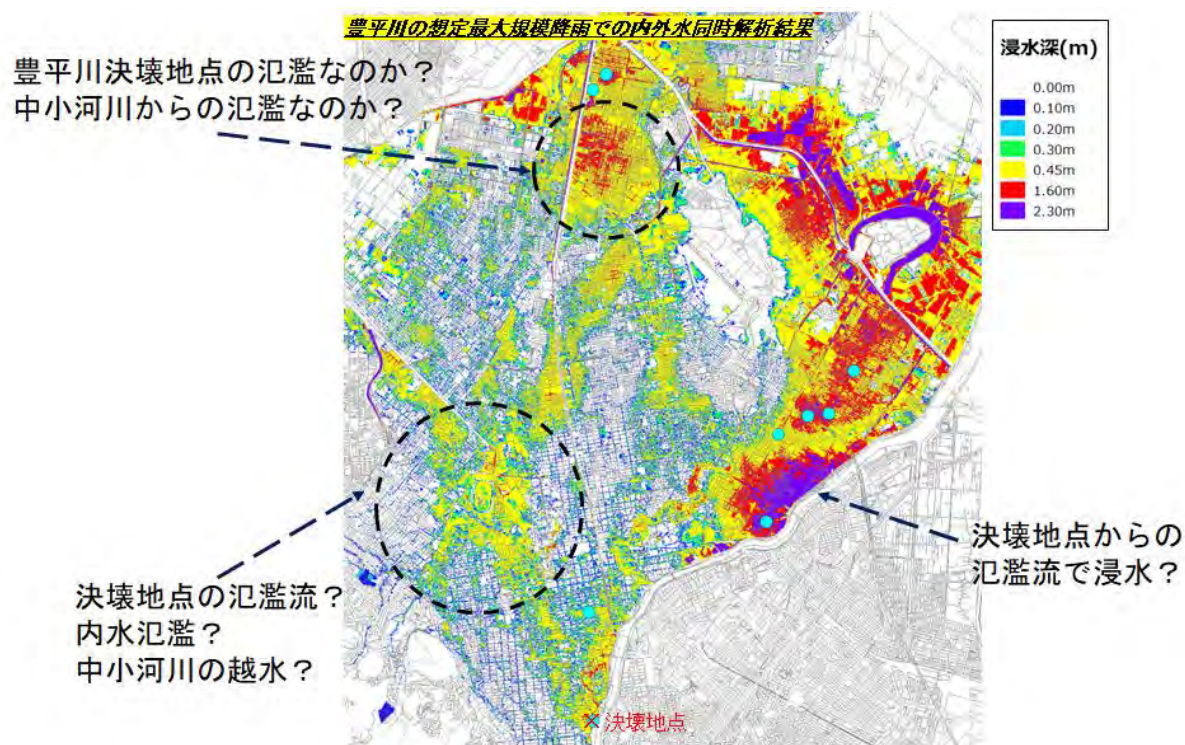


図 4.2.2 内外水同時解析結果の課題（浸水発生要因が複数のため対策の分析が困難）

4.2.2 浸水発生要因の特定手法の提案

本研究では、内水氾濫と外水氾濫による氾濫流の挙動を平面二次元解析で算出した。平面二次元解析手法は、岩佐らの解析手法を基本に、下水道の整備される地区が市街部であることから三浦らの建物からの影響を建物占有率として連続式に考慮する手法を用いた。以下に、本研究で用いた平面二次元解析の連続式と運動方程式を示す。ここで、 Q_x, Q_y : x, y 方向の単位幅流量、 h : 水深、 z_b : 地盤高、 γ : 空隙率 (建物占有率から算定)、 r_{rain} : 地表面に降る降雨、 q_{gesui} : 下水道からの氾濫量、 q_{haisui} : 樋門・樋管等の排水施設からの排水量、 g : 重力加速度、 τ_{bx} τ_{by} : 底面摩擦、 hR_x hR_y : 建物から受ける抵抗力である。本研究では、下水道から内水氾濫を連続式内で考慮した(1)。解析メッシュは、直交座標系の正方形メッシュで設定した。河川の決壊・越水箇所からの氾濫流は、平面二次元解析によって氾濫原を流下させた。下水道からの氾濫量は人孔からの溢水量を地表のメッシュにボリュームとして与えた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma Q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma Q_y)}{\partial y} = q_{gesui} + q_{haisui} + r_{rain} \quad (1)$$

$$\gamma \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{Q_x^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{Q_x Q_y}{h} \right) + g \gamma h \frac{\partial(h + z_b)}{\partial x} + \tau_{bx} + hR_x = 0 \quad (2a)$$

$$\gamma \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{Q_x Q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{Q_y^2}{h} \right) + g \gamma h \frac{\partial(h + z_b)}{\partial y} + \tau_{by} + hR_y = 0 \quad (2b)$$

各地点の浸水がどの要因で発生した氾濫流によるものかを明らかにするために、追跡子を用いる手法を提案した。追跡子の解析モデルへの導入は、村上らが河川の土砂輸送の追跡解析で実施している。追跡子の挙動は、平面二次元解析で算出される各メッシュ間のフラックスの収支から設定した。追跡子は、氾濫流の由来に応じた3つの追跡子を設定した。追跡子の種類は、Ⅰ：河川の決壊地点からの氾濫流、Ⅱ：河川の越水地点からの氾濫流、Ⅲ：下水道からの内水氾濫流とした。以下に、河川から越水した場合を対象に追跡子の設定方法を示す(図 4.2.3)。

(i)河川水位が上昇し堤防高を超過し越水が生じる。(ii)氾濫量を地表の解析メッシュに与え、同時に越水の属性を持つ追跡子を設定する。なお、内水氾濫による追跡子は、下水道からの溢水量を地表のメッシュに与える際に設定する。(iii)氾濫原の平面二次元解析で算定されるメッシュ間のフラックスの移動量に応じて追跡子が移動する。また、追跡子は、メッシュ単位で複数設定することができるため該当メッシュが内水氾濫と河川からの越水等の複数の浸水発生要因で浸水が発生したことを示すことが可能である。

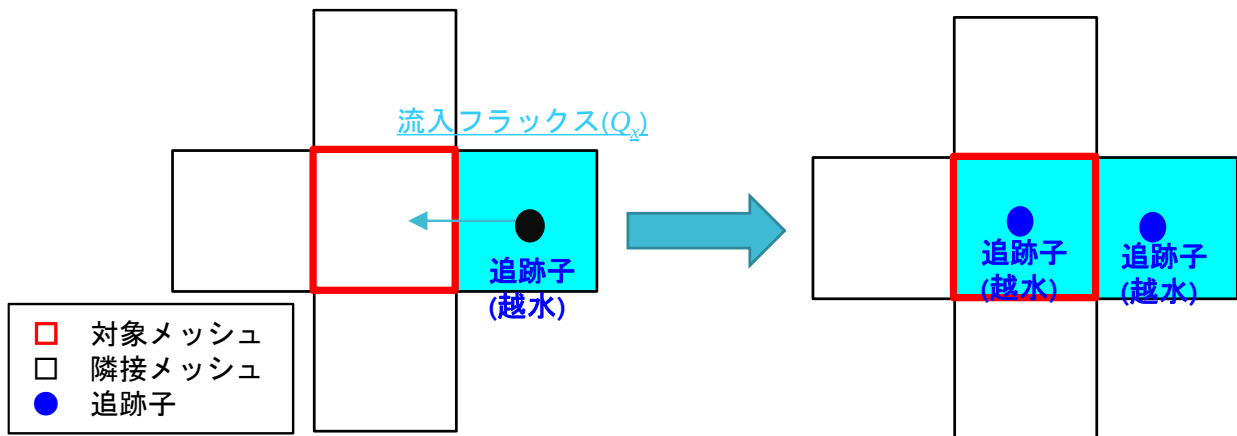
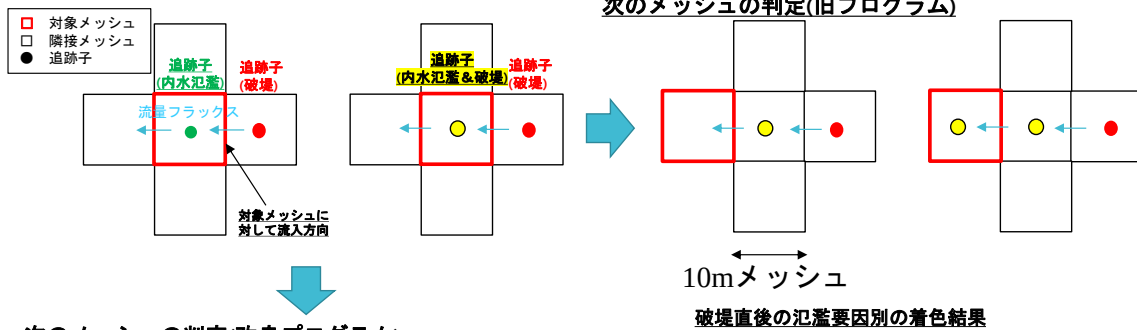
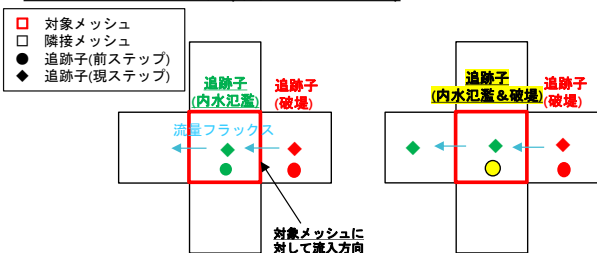


図 4.2.3 流入フラックスを用いた追跡子の設定方法

同タイムステップ内の追跡子の挙動($dt=0.1s$)



次のメッシュの判定(改良プログラム)



計算間隔、流速、メッシュサイズから
追跡の移動判定を行う必要がある。

図 4.2.4 追跡子の時間的挙動のアルゴリズム

4.2.3 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（着色実験の実施）

内外水同時解析モデルに、追跡子を導入して氾濫解析を実施し、浸水発生箇所の要因を特定した。対象降雨規模は、図 4.2.5 の豊平川の想定最大規模降雨（雁来地点上流域 406mm/72 時間）とした。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。豊平川の想定最大規模降雨時の最大降雨強度 70mm/h は、札幌市の下水道整備の計画規模 35mm/h を上回っており内水氾濫が発生することが想定される。豊平川の決壊地点は、札幌市街部へ氾濫流が最も流下する KP17.0 地点とし、計算水位が計画高水位に達した時点で決壊するものとした。また、各河川の計算水位が堤防高を超過した場合は、越水が発生するものとした。

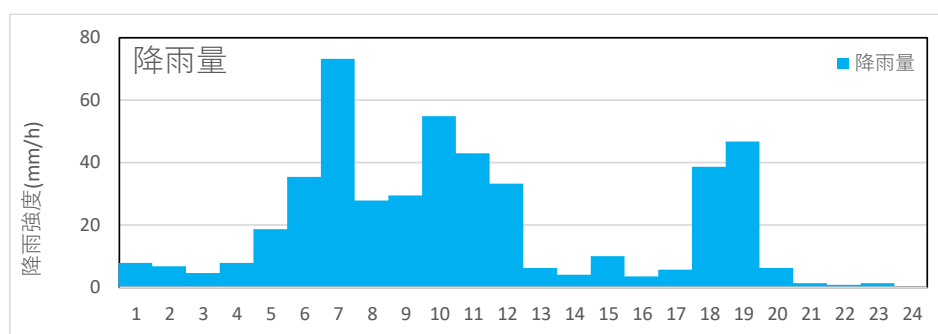


図 4.2.5 豊平川の想定最大規模降雨時の札幌市街部の降雨量

(降雨波形：昭和 56 年 8 月下旬降雨)

想定最大規模降雨では、図 4.2.6 に示すように札幌市街部の広域が浸水する。豊平川の左岸下流部では最大浸水深が人的被害が発生すると考えられる 2.3m を超過する。また、最大流速図では氾濫流が札幌駅周辺を流速 1.5m 以上で流下する。追跡子を導入した解析結果を用いて、浸水発生要因の特定を実施した。追跡子は、浸水発生要因別に「光の 3 原色」を割り当て時系列図で可視化した。各色の割り当ては、Ⅰ：河川の堤防決壊地点からの氾濫流を赤、Ⅱ：河川の越水地点からの氾濫流を青、Ⅲ：下水道からの内水氾濫流を緑とした。各浸水発生要因の氾濫流が混ざると、浸水メッシュに複数の追跡子が設定され、色が変化し浸水発生要因を示すことができる。例えば、河川氾濫前の内水氾濫によって浸水したメッシュは緑色に着色され、決壊地点の氾濫流が到達することで該当メッシュは黄色に変化する。

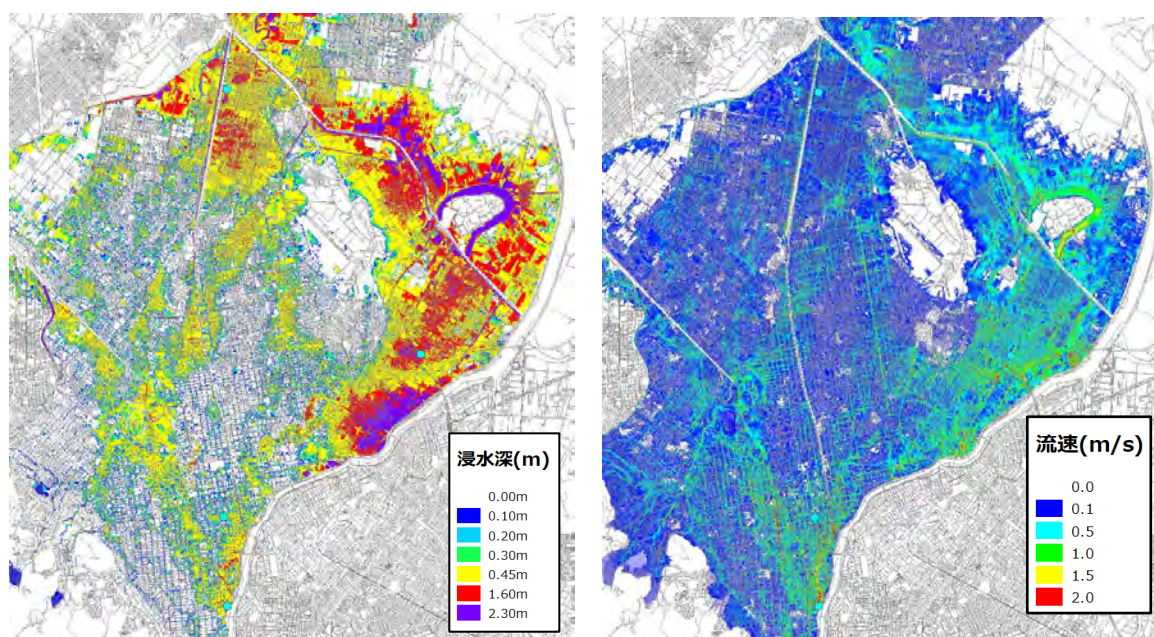


図 4.2.6 豊平川の想定最大規模降雨での最大浸水深と最大流速

追跡子を用いた浸水発生要因の可視化結果を、図 4.2.7 に示す。図 4.2.7 は、計算開始 7 時間目の 70mm/h の降雨で内水氾濫が発生し、浸水メッシュは緑に着色される。その後、図 4.2.7-(2)では、豊平川の 17.0k の計算水位が計画高水位を超過し決壊が生じた 2 時間後を示している。決壊地点による氾濫流は、内水氾濫で発生した氾濫流と混ざり黄色に変化しながら札幌市中心部を流下する。また、市内の中小河川でも越水が発生し、内水氾濫と混ざり流下している。そして、図 4.2.7-(3)では、豊平川の下流で越水が発生し、越流箇所のメッシュは青色に着色される。図 4.2.7-(4)の浸水発生要因の可視化により各地区が時間的にどの要因で浸水が発生しているかを明瞭に示している。これにより、住民が自身の住む場所が時間的にどの要因で浸水が想定されるのかを分かり易く示すことができる。本研究では、浸水発生要因としたが、複数の河川が貫流する地区では、河川ごとに追跡子を設定することで、各地区がどの河川の氾濫に注意すべきなのか等を示すことも可能である。



計算開始7時間後

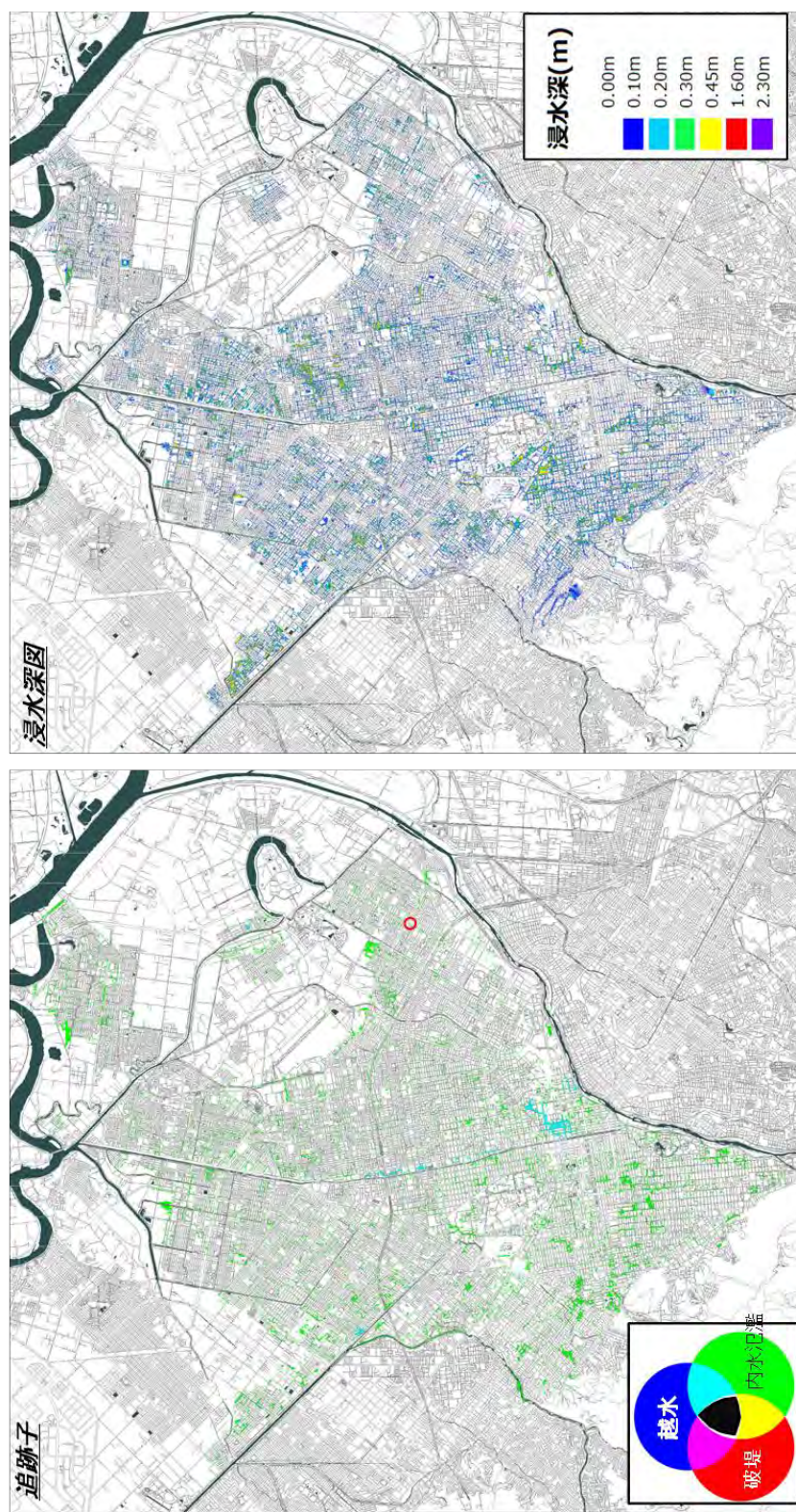


図 4.2.7(1) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定 (時系列浸水深図 計算開始 7 時間後)



計算開始9時間30分後

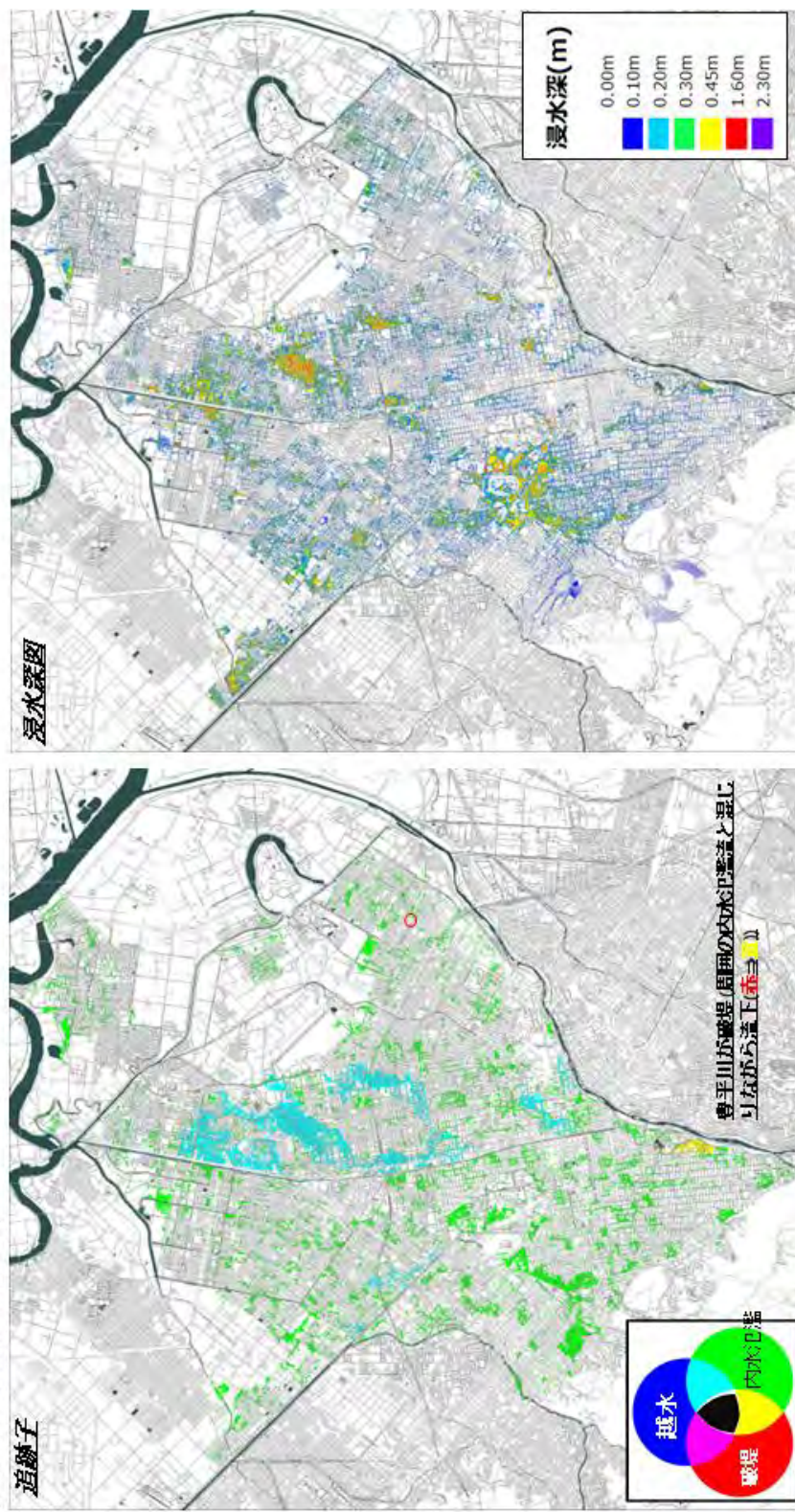


図 4.2.7(2) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定 (時系列浸水深図 計算開始 9 時間 30 分後)



計算開始10時間30分後

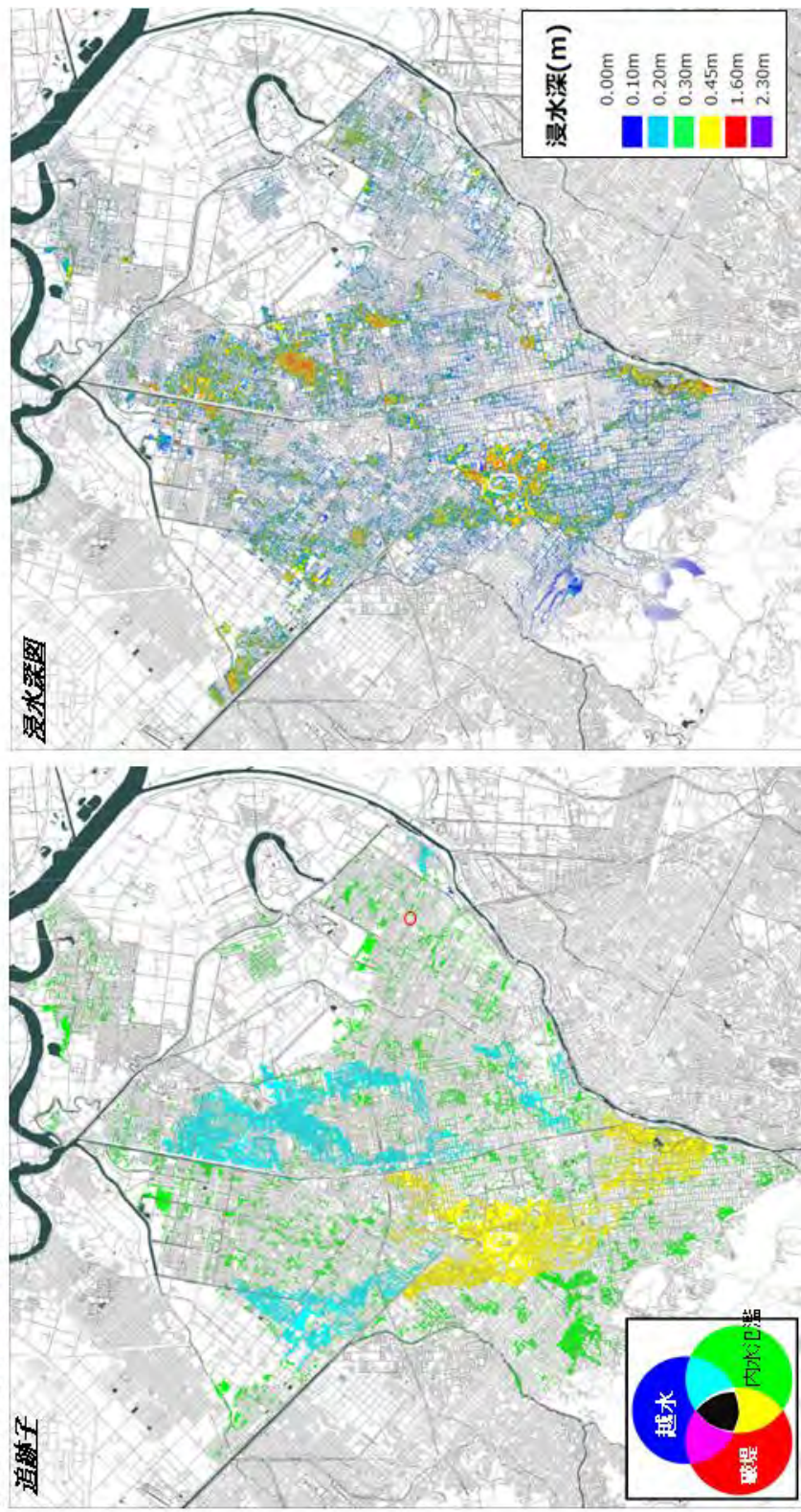


図 4.2.7(3) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 計算開始 10 時間 30 分後）



計算開始11時間30分後

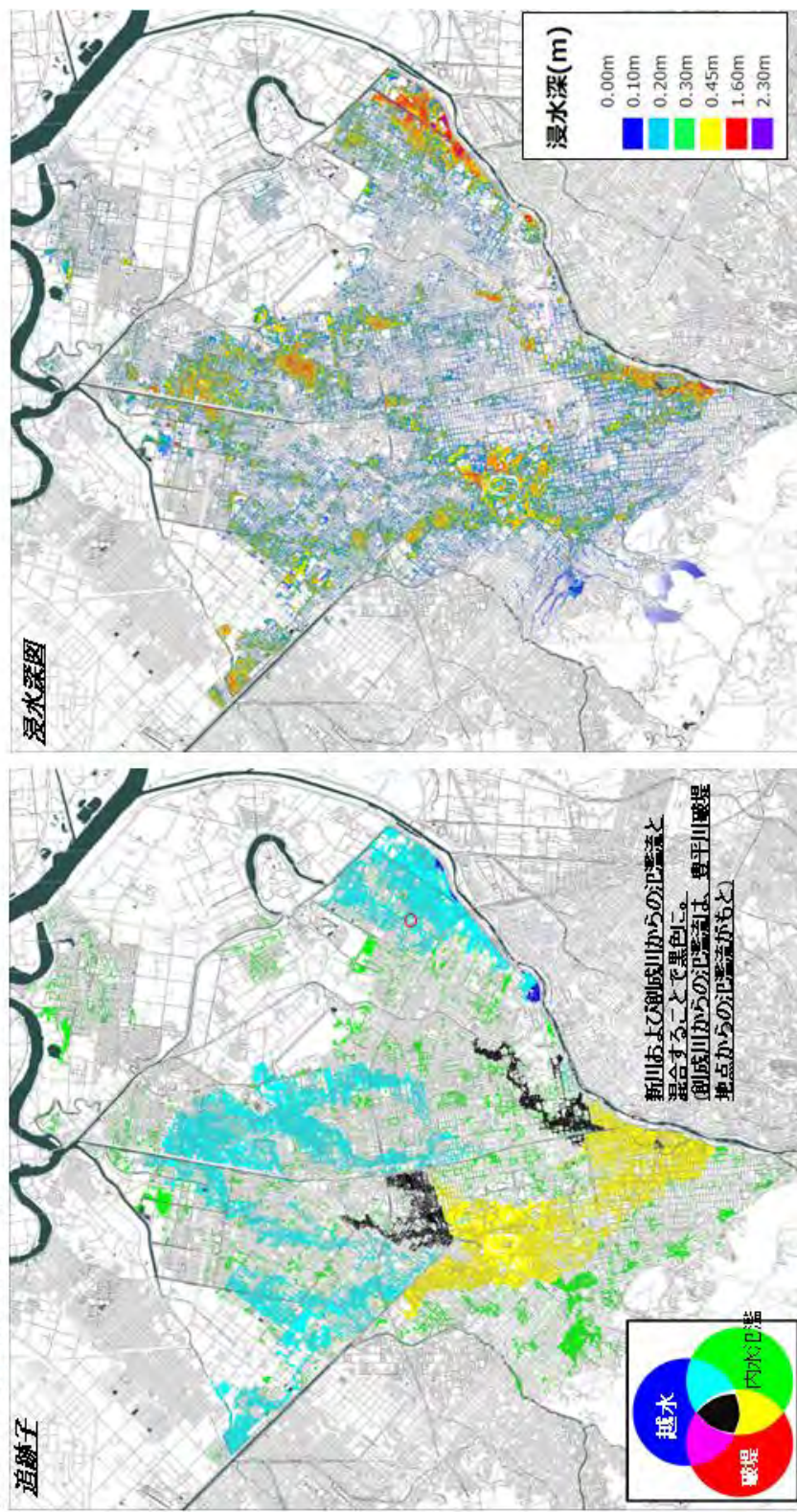


図 4.2.7(4) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 計算開始 11 時間 30 分後）



計算開始13時間30分後

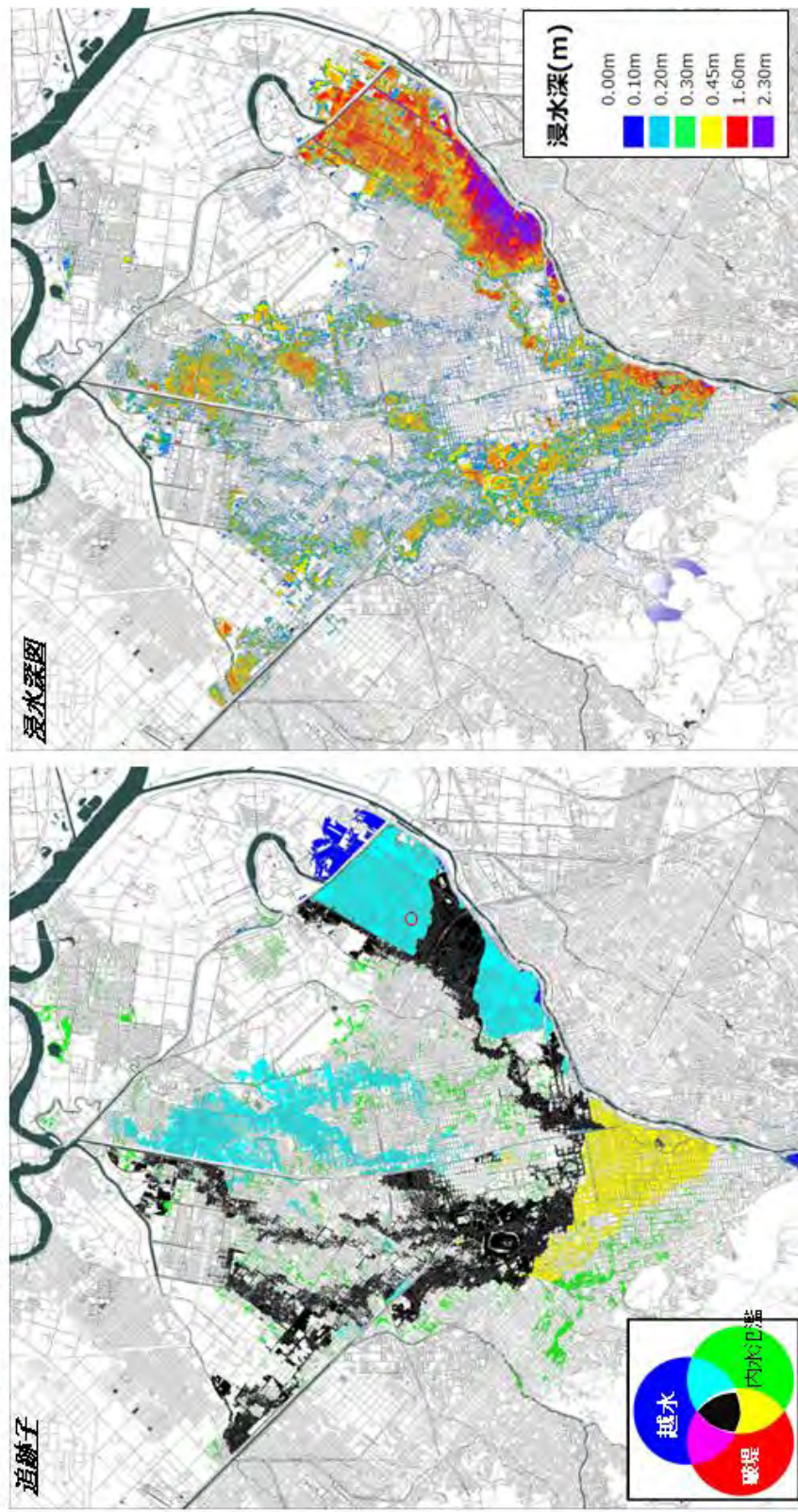


図 4.2.7(5) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定 (時系列浸水深図 計算開始 13 時間 30 分後)

4.2.4 内外水同時解析による浸水発生要因に着目した浸水被害特性の評価手法の提案

内外水同時解析結果を用いて、浸水発生要因に着目した被害特性の分析と評価を実施した。浸水による被害は、既往研究で著者らが提案した各種マニュアル、手引き、既往研究で提案されている浸水被害を流速と浸水深を統合した浸水リスクランク(以後、リスクランク)を用いた。リスクランクは、浸水発生、車両移動困難、歩行困難、家屋の床上浸水、甚大な被害(死者発生・家屋倒壊発生)の5つに分類した。4地点を対象に、図 4.2.8 に時系列的な水理量の変化とリスクランクを示す。以下に、各地点における浸水特性を示す。A 地点と D 地点は、図 4.2.8 の追跡子を用いた浸水発生要因の可視化結果で時系列的に色が変化している(浸水発生要因が複数ある)。各浸水発生要因によってどのリスクランクに達しているかが重要である。

【浸水発生要因に着目した浸水被害特性の分析】

- ・ A 地点は、浸水深が緩やかに上昇している。これは、内水氾濫発生後に、豊平川の決壊地点からの氾濫流が到達し浸水深が増加している。
- ・ B 地点のように、時系列的な水理量の変化が大きい場合は、プロットの間隔が広くなり急激に水位が上昇したことを示している。
- ・ B 地点は、急激に浸水深が増加している。これは、豊平川の堤防決壊地点近傍であるため、決壊地点からの氾濫流が流下するため急激に水位が上昇している。
- ・ C 地点は、決壊地点の下流域で扇状地であるため氾濫流は流下していく。
- ・ D 地点は、豊平川の越水地点の近くとなっており、豊平川の決壊地点と越水地点両方の氾濫流が流下する。
- ・ 各地点の浸水特性に注目すると、B 地点と C 地点は豊平川からの氾濫流による被害が支配的であることが明らかであり、住民は豊平川に注目することが重要となる。また、決壊地点が変化することで浸水特性が変化することを認識する必要がある。

D 地点を対象に、図 4.2.8 に示すように浸水要因の時系列変化が分かるように実線プロットの色を浸水要因に応じて変化させリスクランクに記載した。D 地点は、内水氾濫によって歩行困難となるリスクランクに到達し、その後豊平川からの越水流によって 1.6m 程度まで浸水深が上昇し、更に決壊地点からの氾濫流が到達することで浸水深は 2.0m を超過する。D 地点周辺の住民は、内水氾濫から豊平川の決壊まで複数の浸水要因で浸水の生じる地区であることを認識する必要がある。

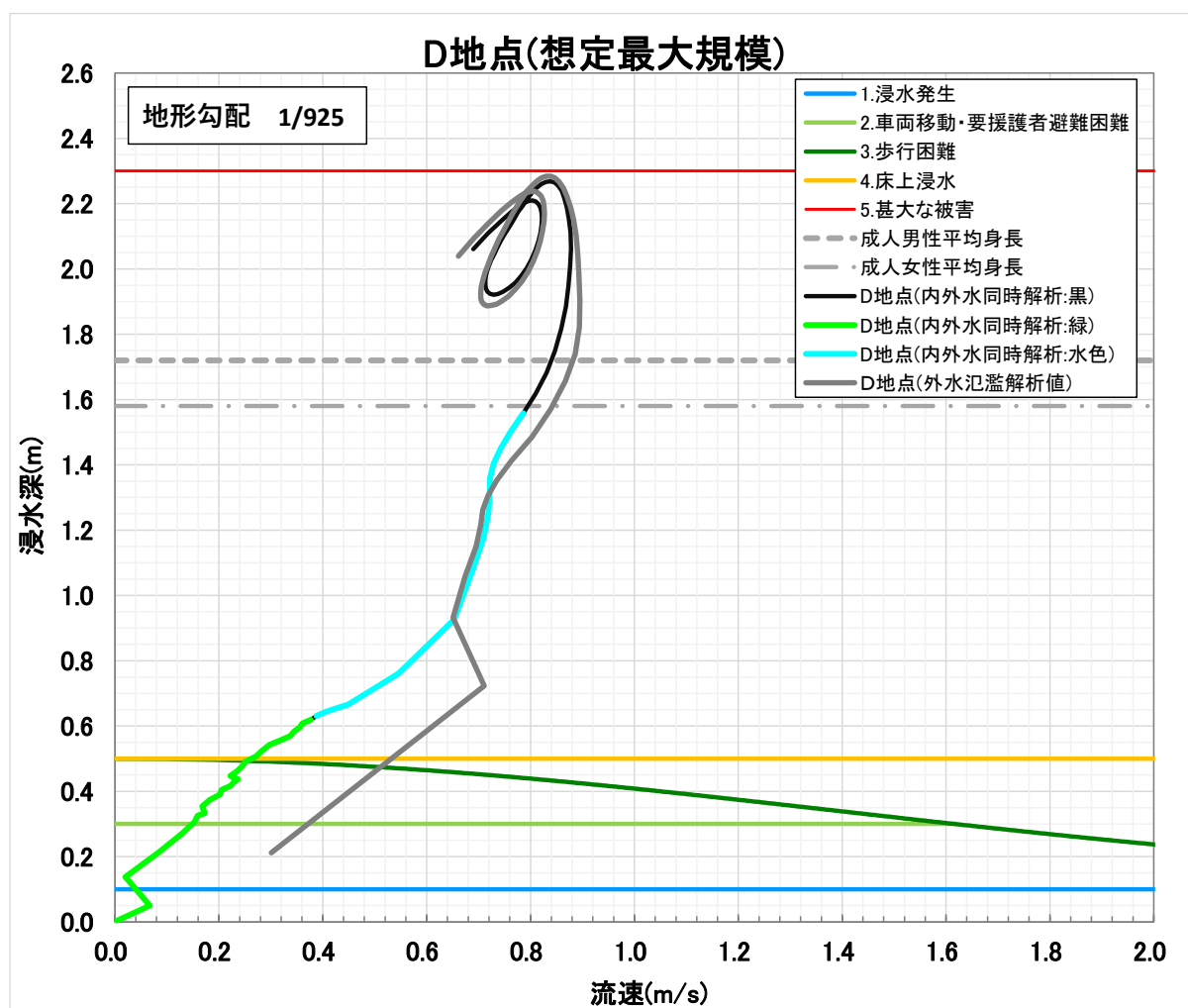


図 4.2.8 D 地点の浸水発生要因を考慮した浸水リスクランク

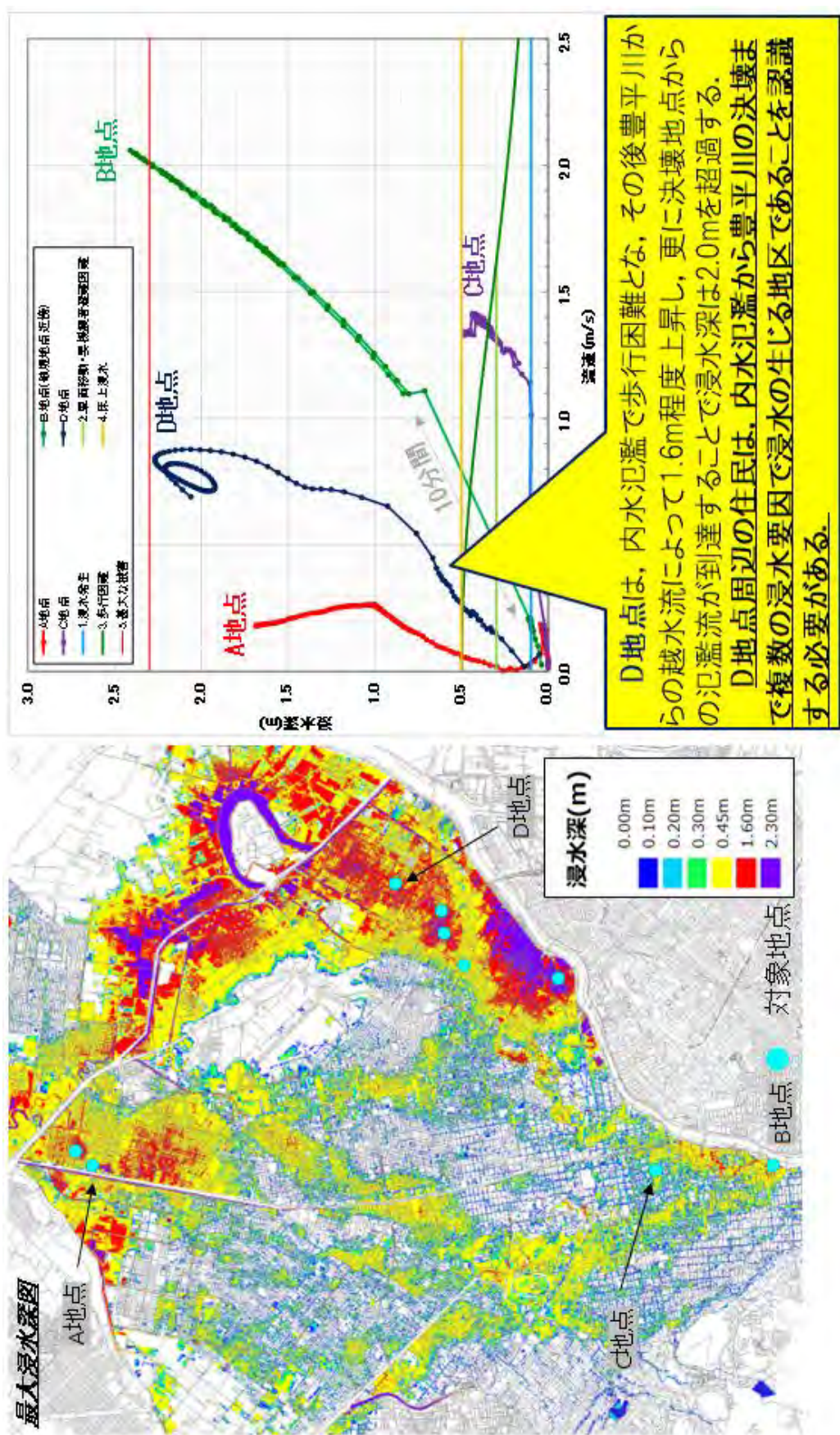


図 4.2.9(1) 本解析結果を用いた代表地点における浸水リスクの時間変化

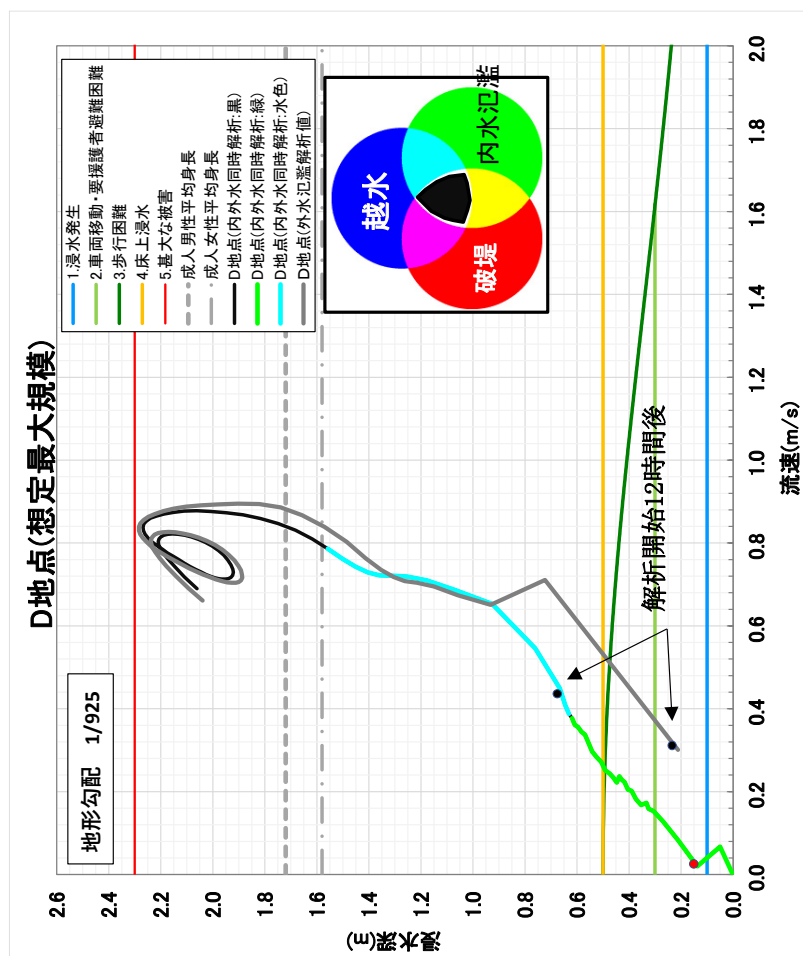
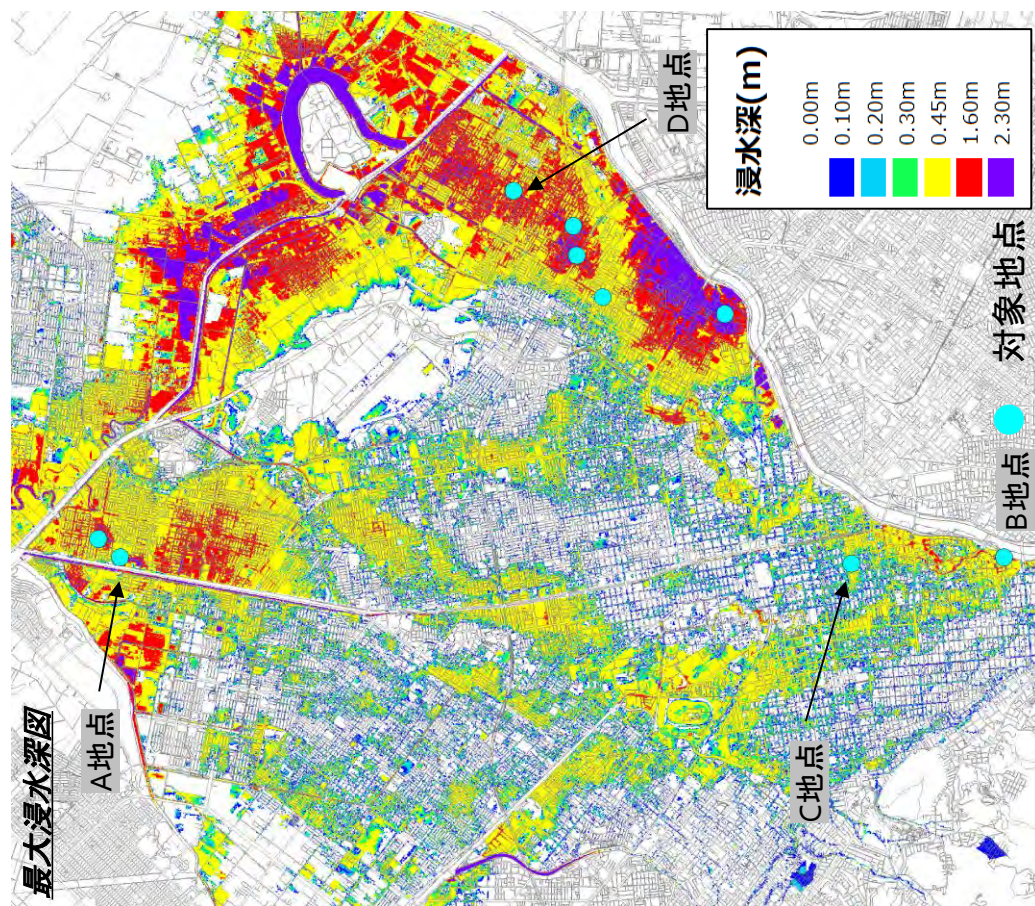


図 4.2.9(2) 本解析結果を用いた代表地点における浸水リスクの時間変化

4.2.5 本研究を踏まえた内水対策効果の評価

豊平川の越水流と決壊のみを考慮した外水氾濫のみの解析値も記載している。内外水同時解析結果と外水氾濫結果を比較すると、最大浸水深は豊平川からの氾濫流が支配的である。しかしながら、浸水の発生時刻に注目すると 3.5 時間の差がある。豊平川の水位が上昇し、住民が安全に避難する時間と経路の確保の観点から該当地区の内水対策が重要であることを示している。これは、内水氾濫に対する下水道整備は、河川が氾濫するような大規模な洪水時にも効果があることを示している。大規模な洪水時に人的被害を軽減するためには、各管理者で協力し治水整備を実施することが必要である。そのため、当地区の治水安全度の向上には、内水氾濫と外水氾濫の両面に着目したハード整備と、複数の浸水発生要因を考慮した避難計画等のソフト対策が必要である。

4.2.6 豊平川の外水氾濫のみを対象とした浸水発生要因に着目した浸水被害特性の評価

外水氾濫(破堤, 越水)を対象に浸水発生要因を追跡子で分析した。対象降雨規模は, 豊平川の想定最大規模降雨(雁来地点上流域 406mm/72 時間)とした。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。豊平川の想定最大規模降雨時の最大降雨強度 70mm/h は, 札幌市の下水道整備の計画規模 35mm/h を上回っており内水氾濫が発生することが想定される。豊平川の決壊地点は, 札幌市街部へ氾濫流が最も流下する KP17.0 地点とし, 計算水位が計画高水位に達した時点で決壊するものとした。図 4.2.12 に上述の同外力条件を対象とした外水氾濫のみと内外水同時解析の比較図を示す。破堤後における浸水域は, どちらのケースも同程度となるが, 破堤直前までの浸水範囲については内水氾濫が考慮されていないために, 外水氾濫のみの解析では少なくなっている。

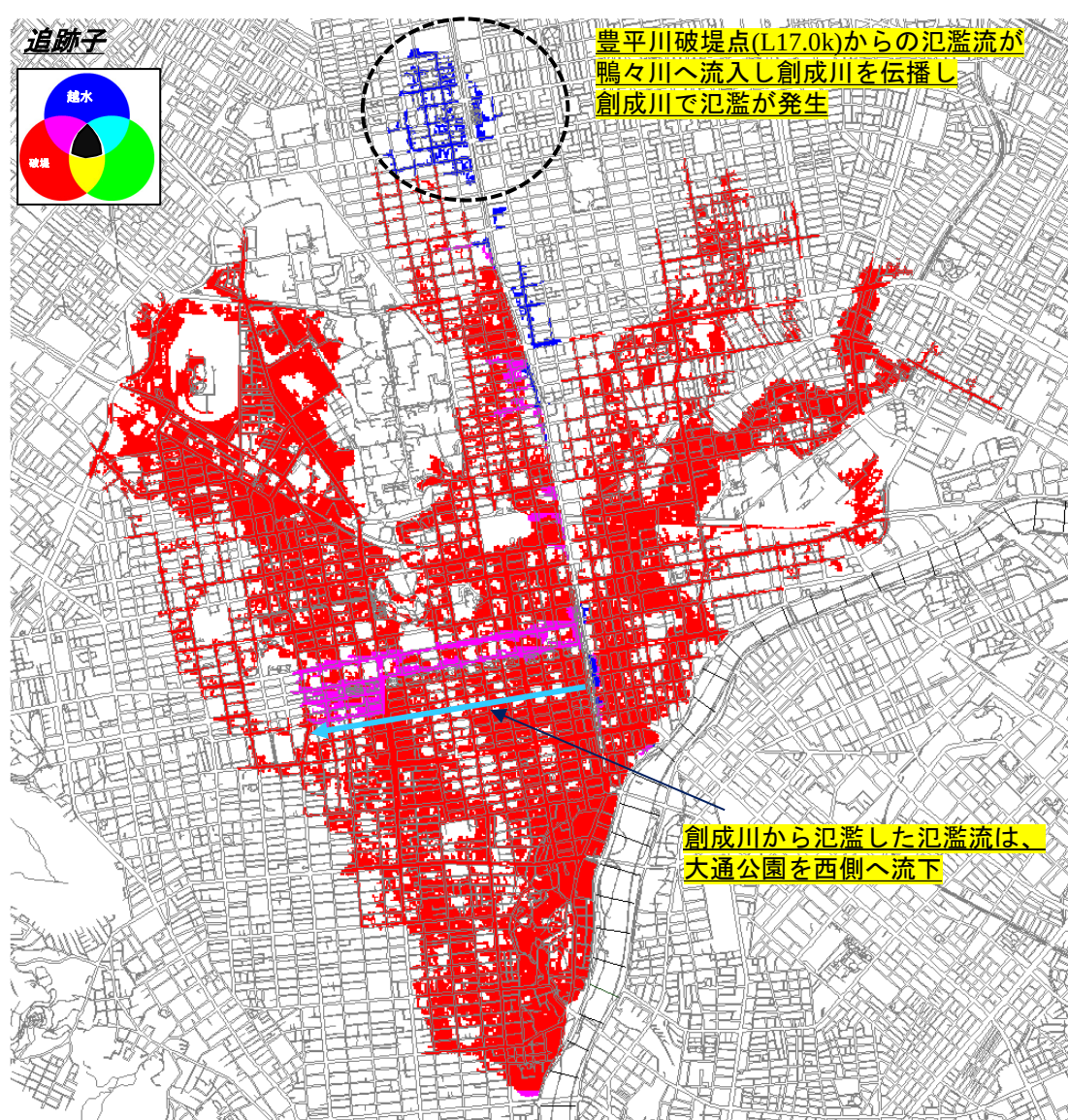


図 4.2.10 札幌駅前の浸水発生要因の分析

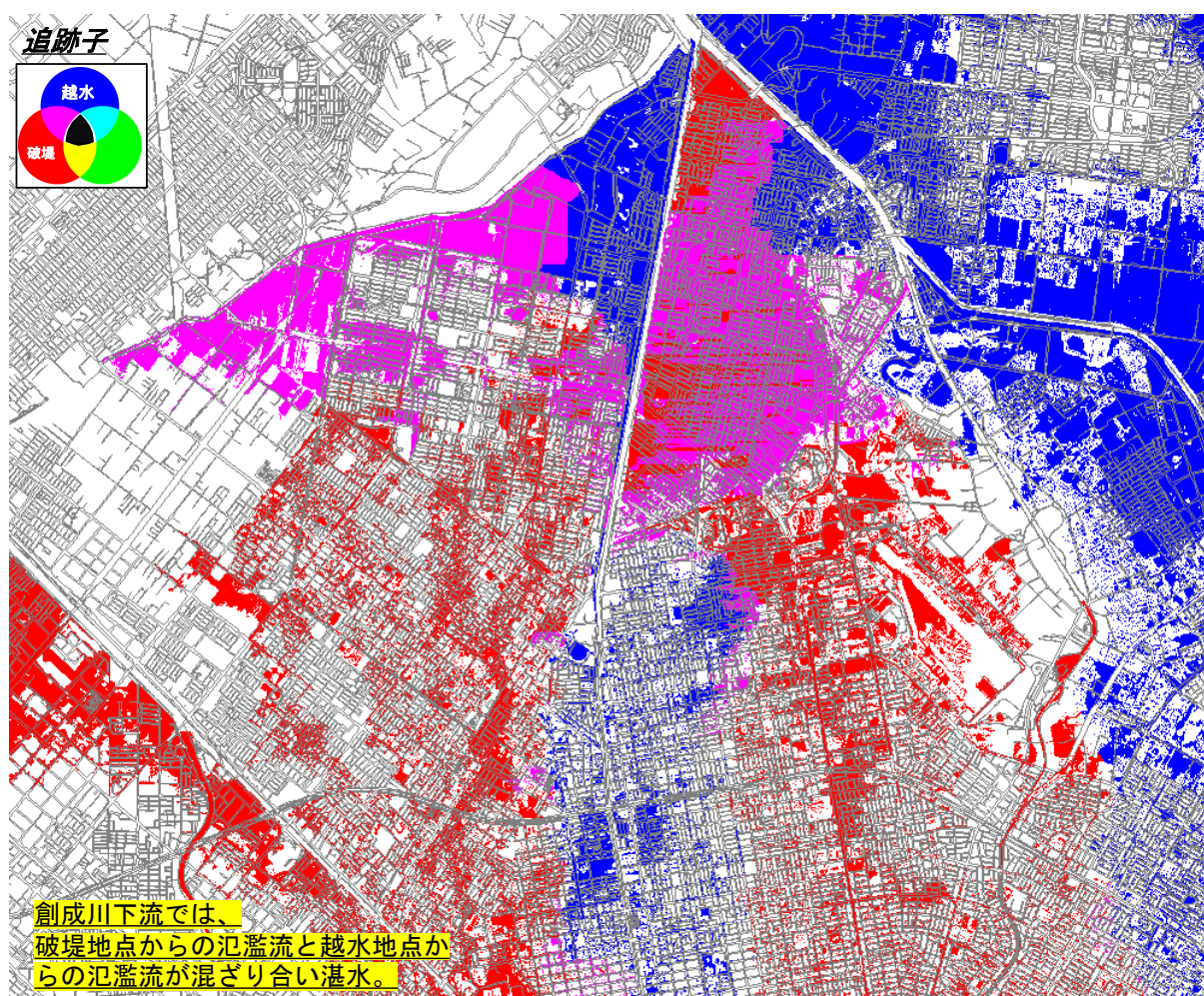


図 4.2.11 札幌市北区の浸水発生要因の分析

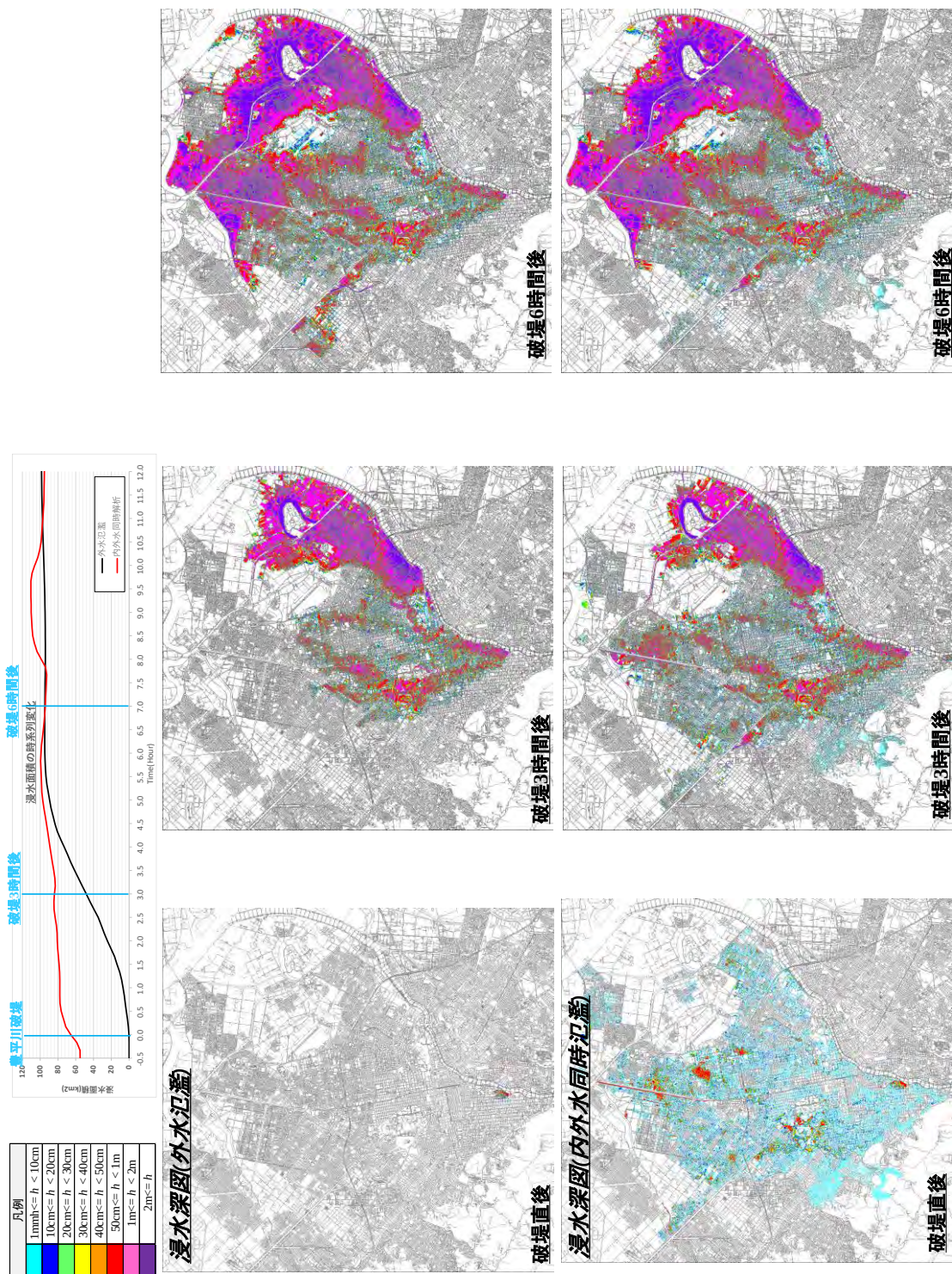


図 4.2.12 氾濫発生要因別の着色実験(内外水同時解析との比較・分析)

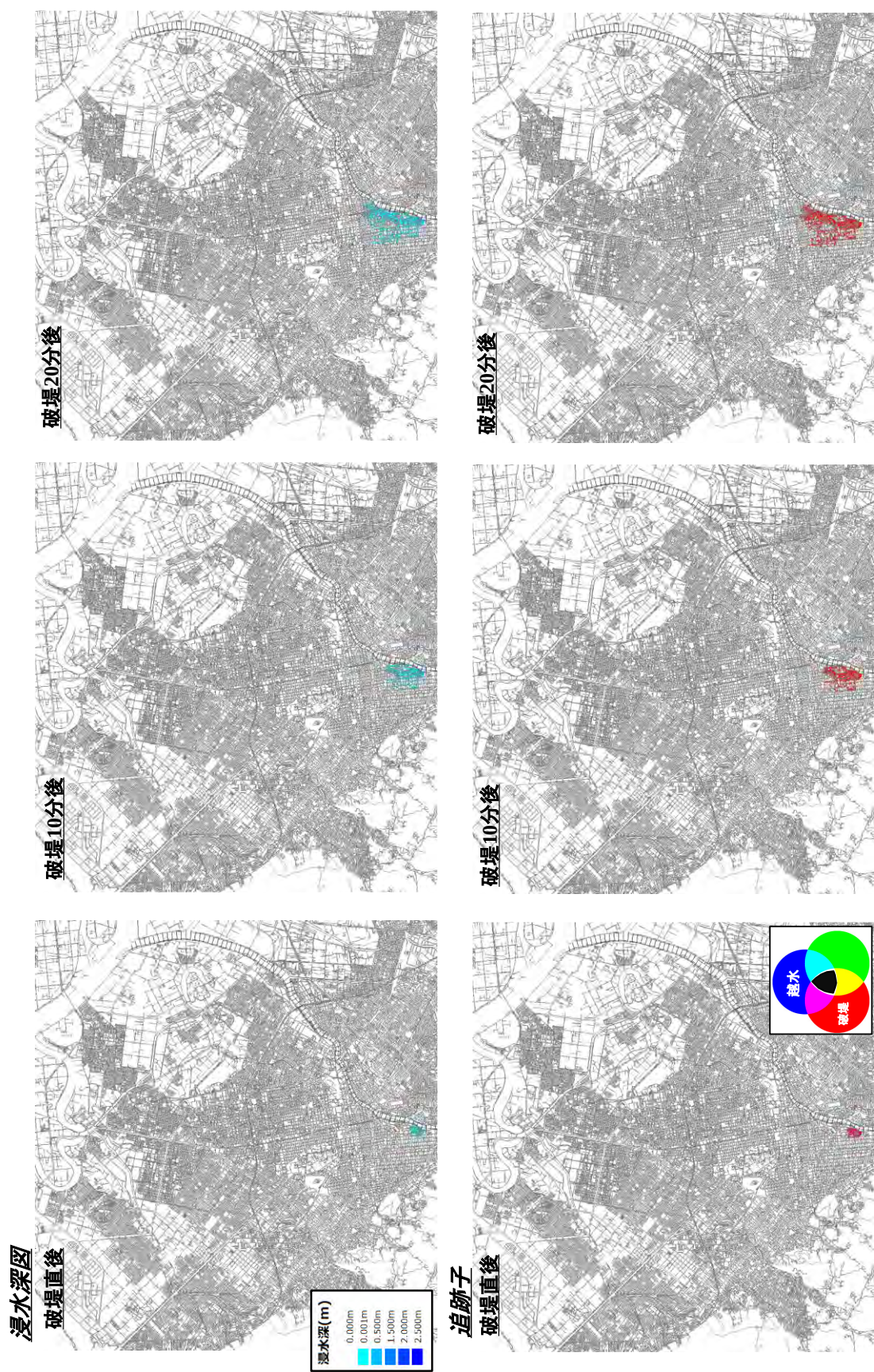


図 4.2.13(1) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

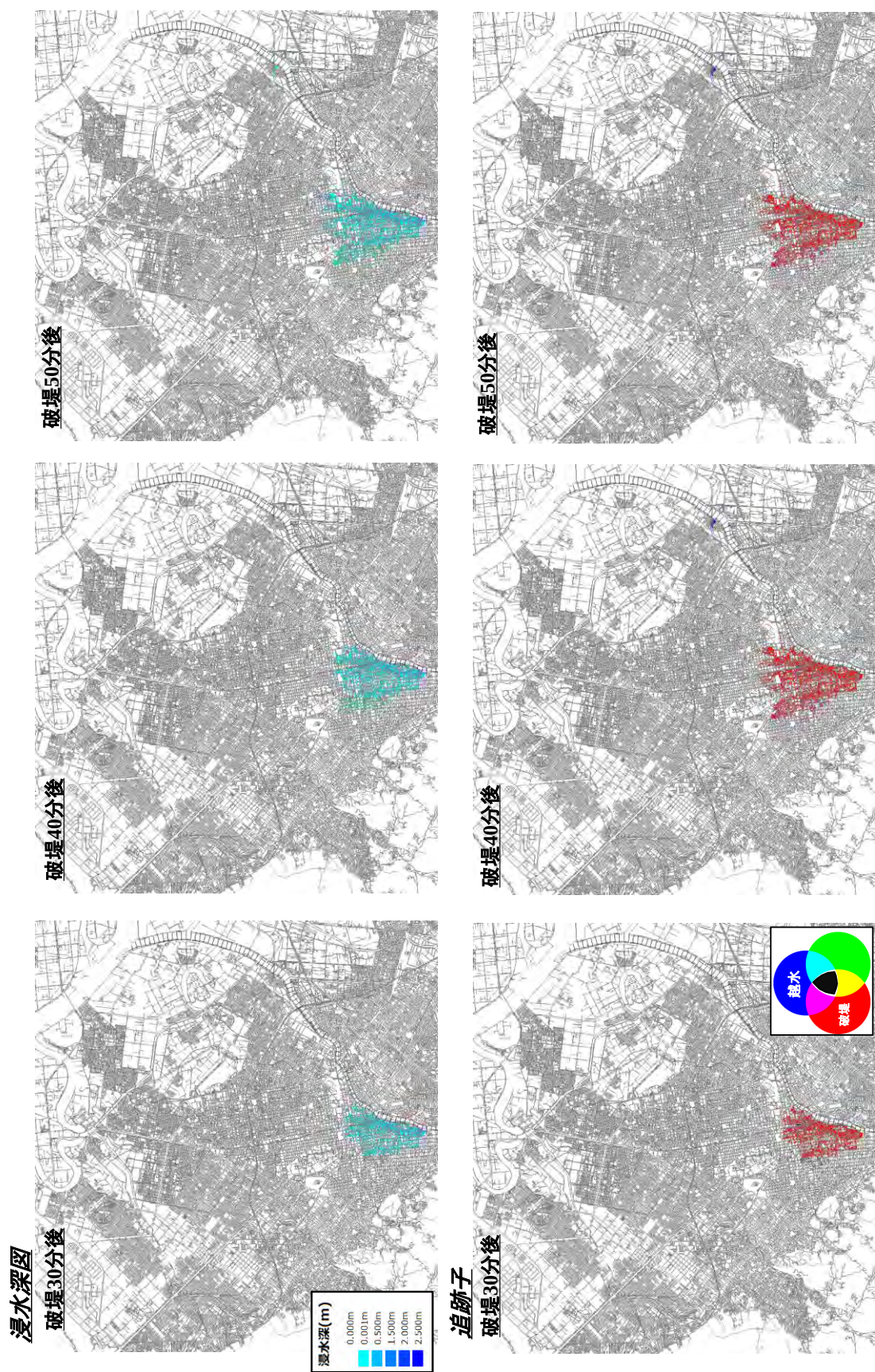


図 4.2.13(2) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

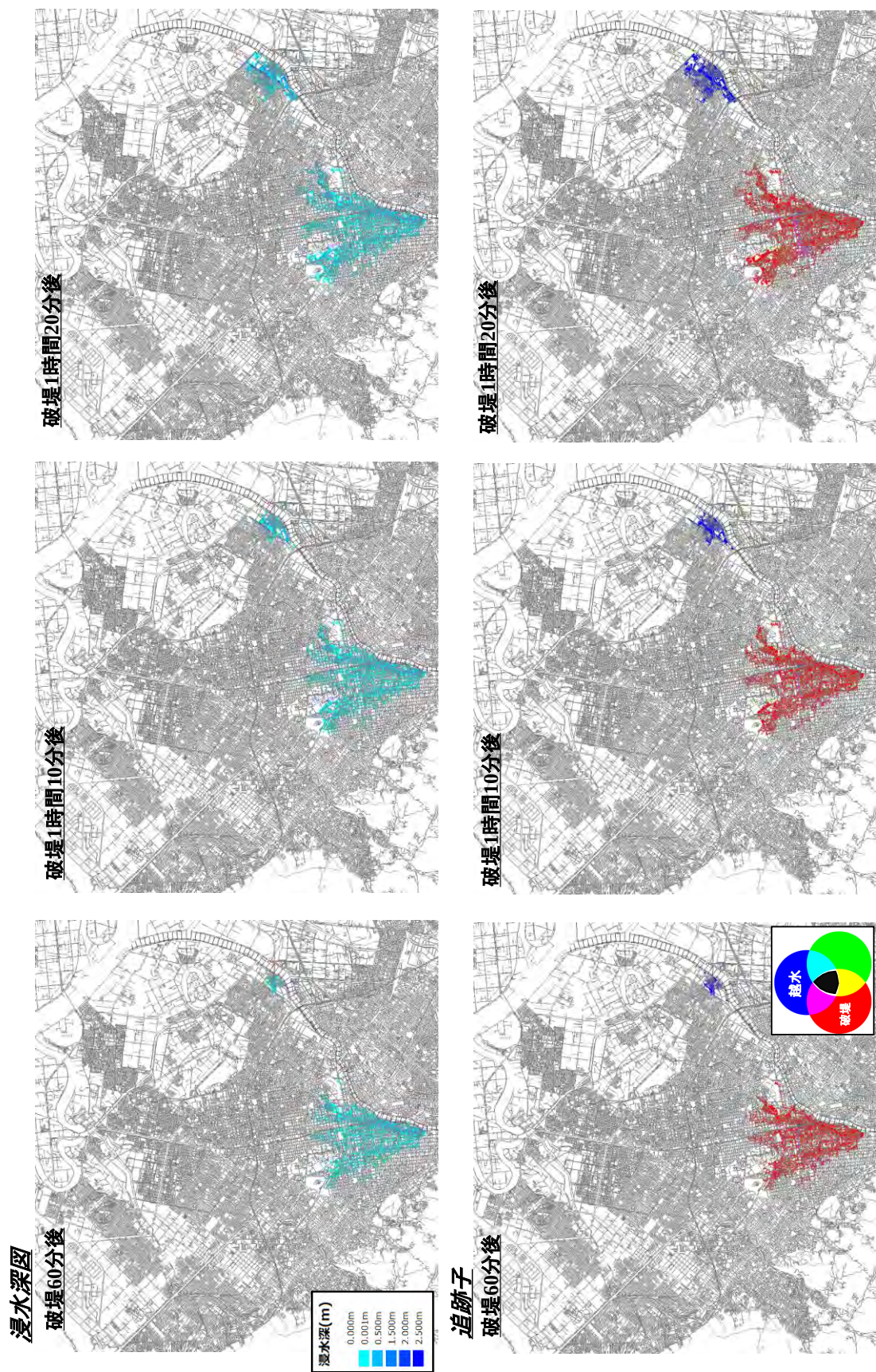


図 4.2.13(3) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

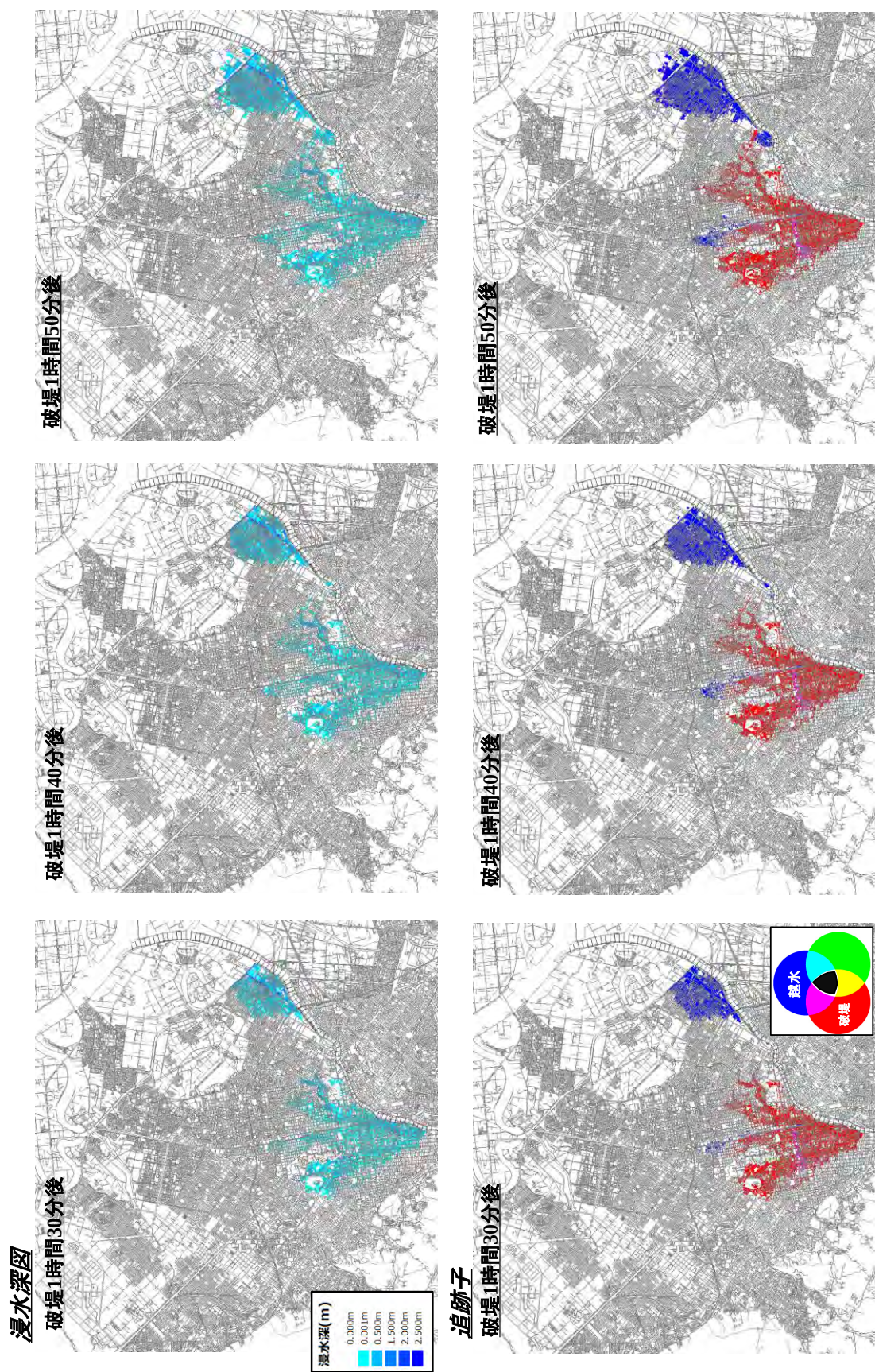
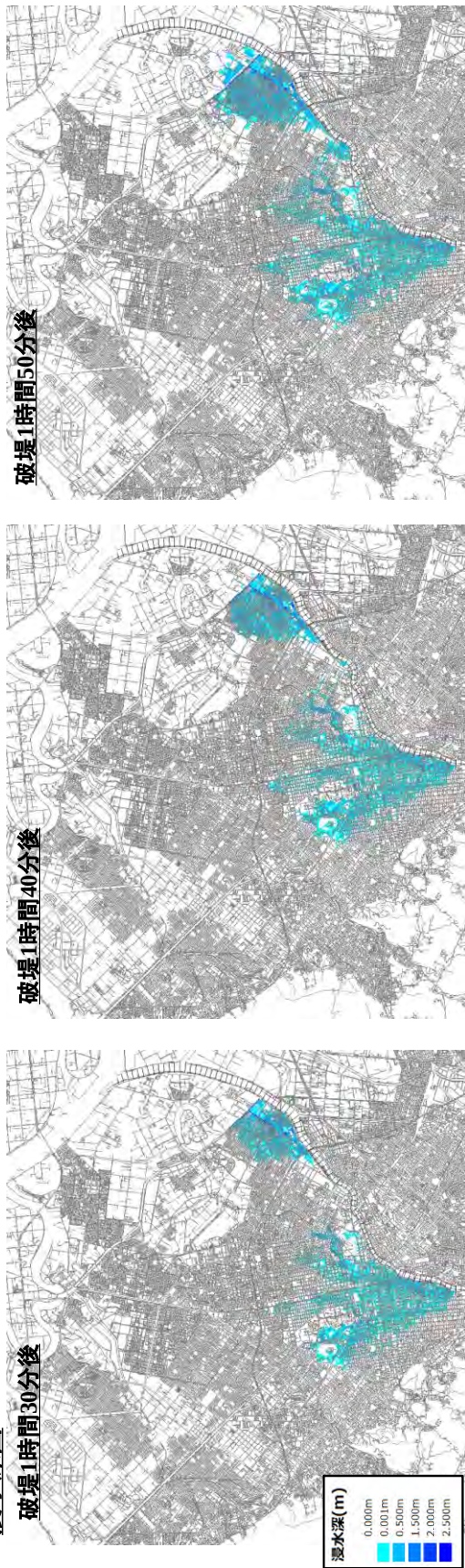


図 4.2.13(4) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定 (時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ)

浸水深図



追跡子

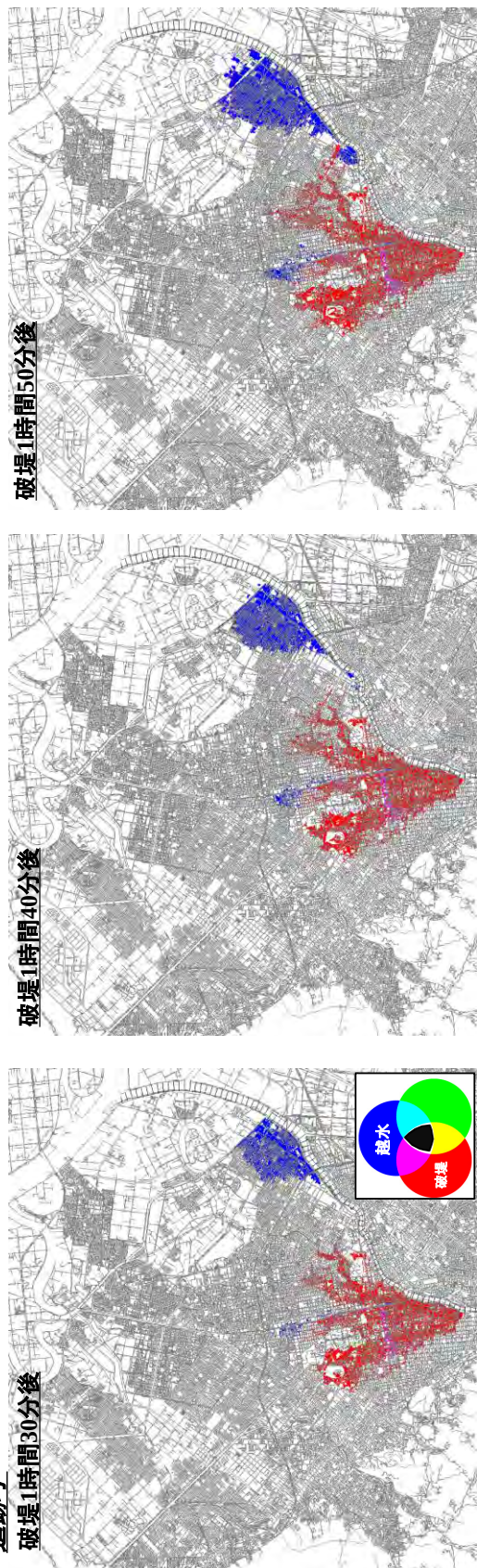


図 4.2.13(5) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

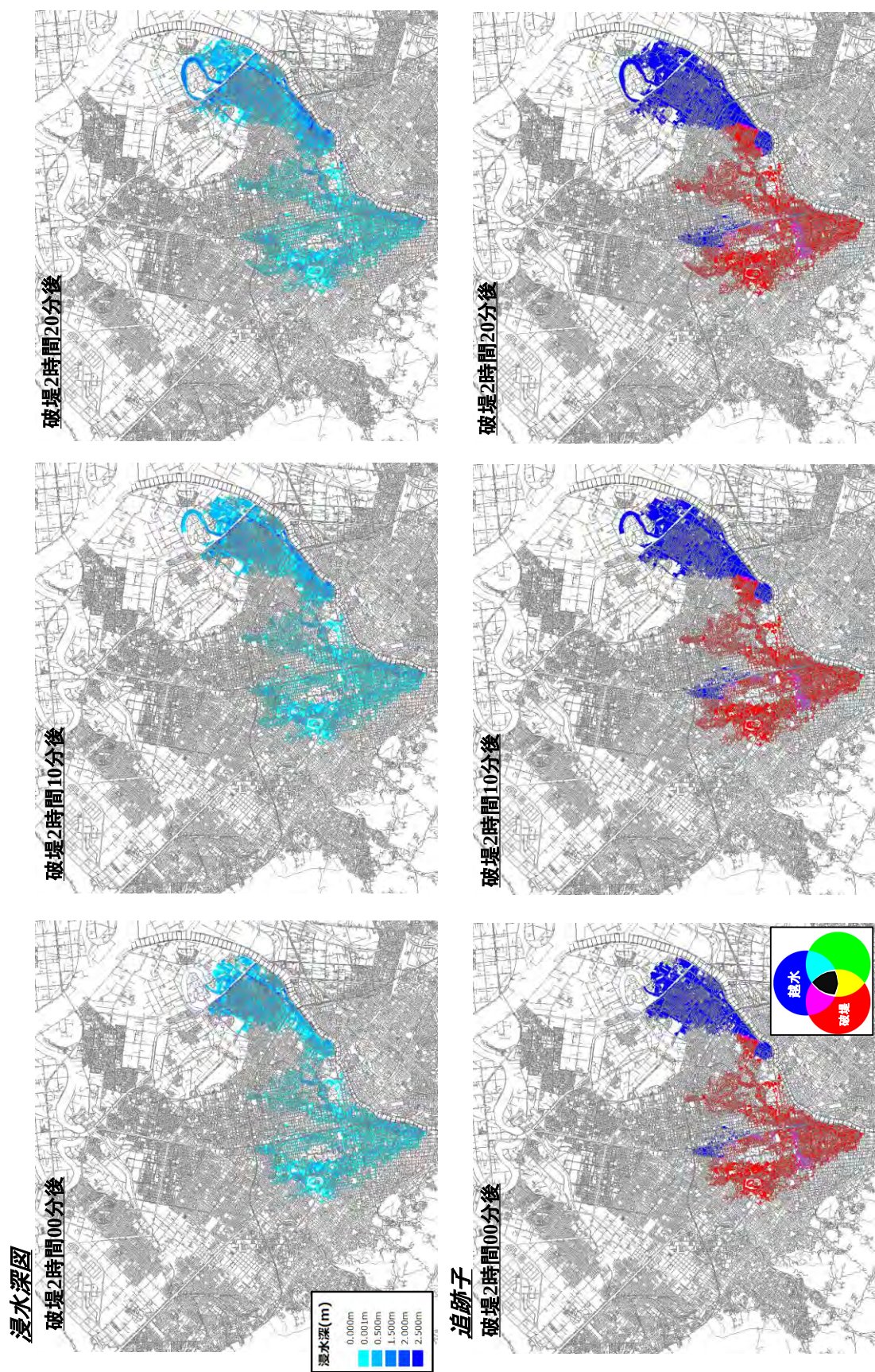


図 4.2.13(6) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

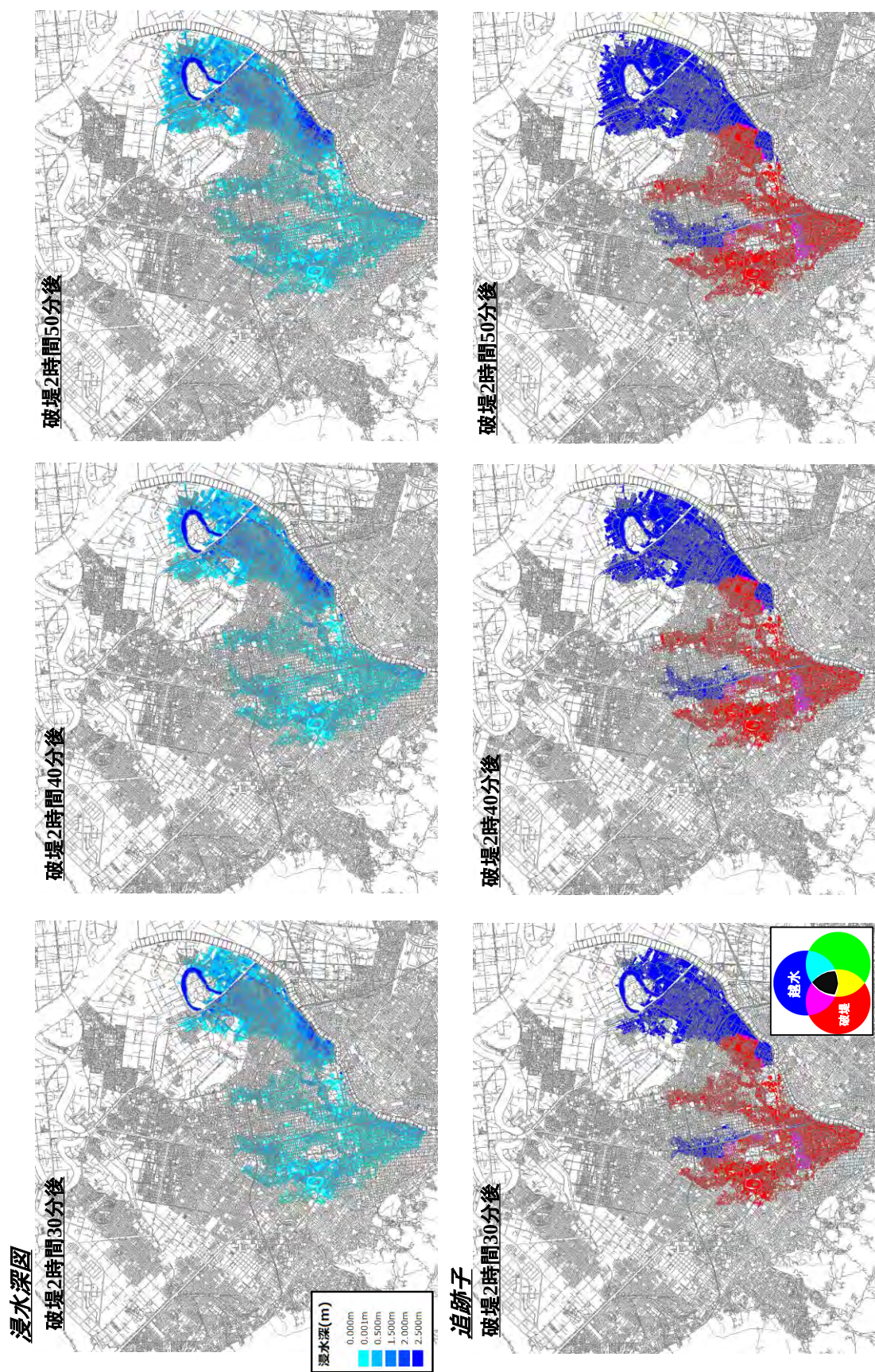


図 4.2.13(7) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

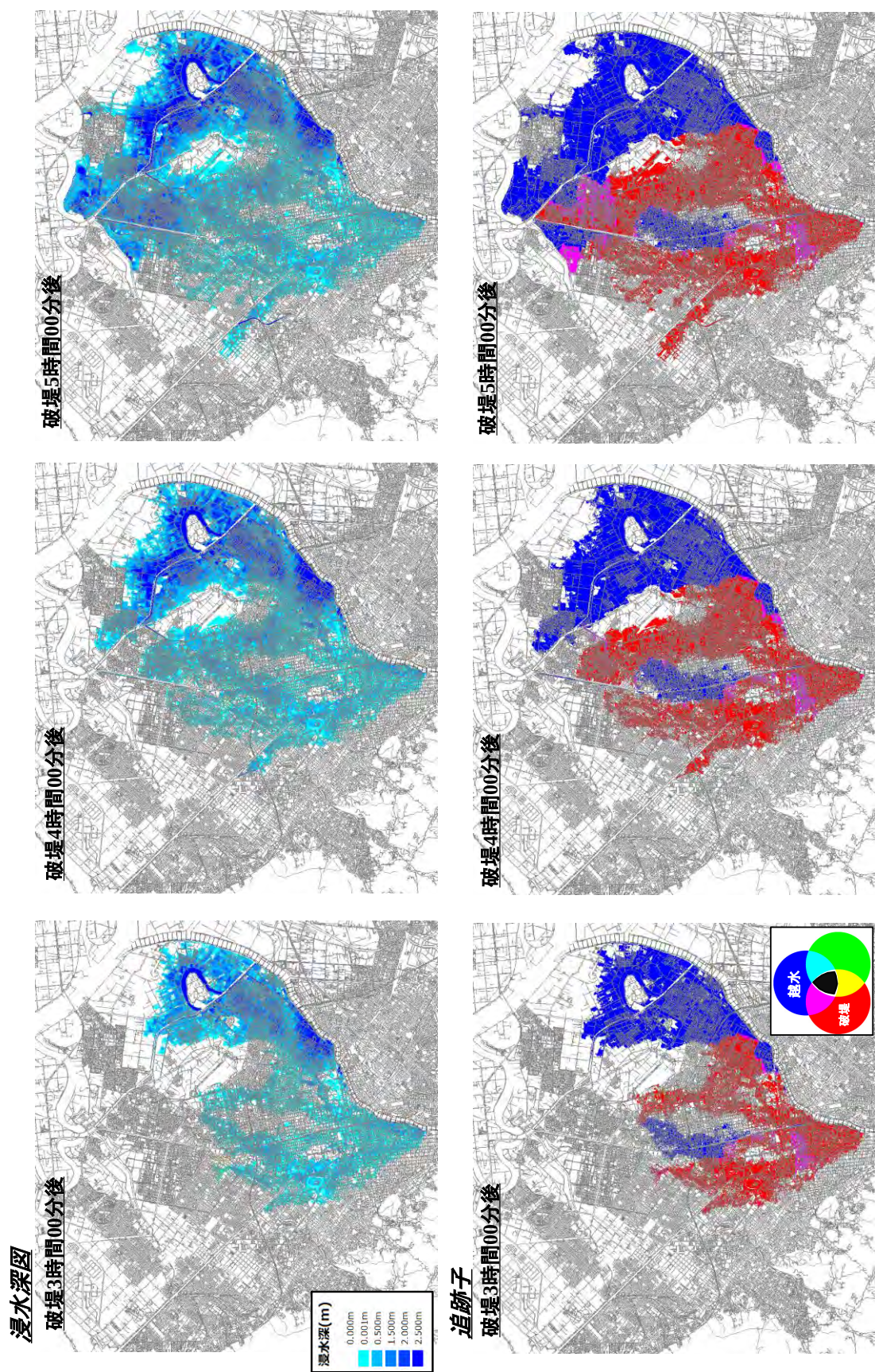


図 4.2.13(8) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

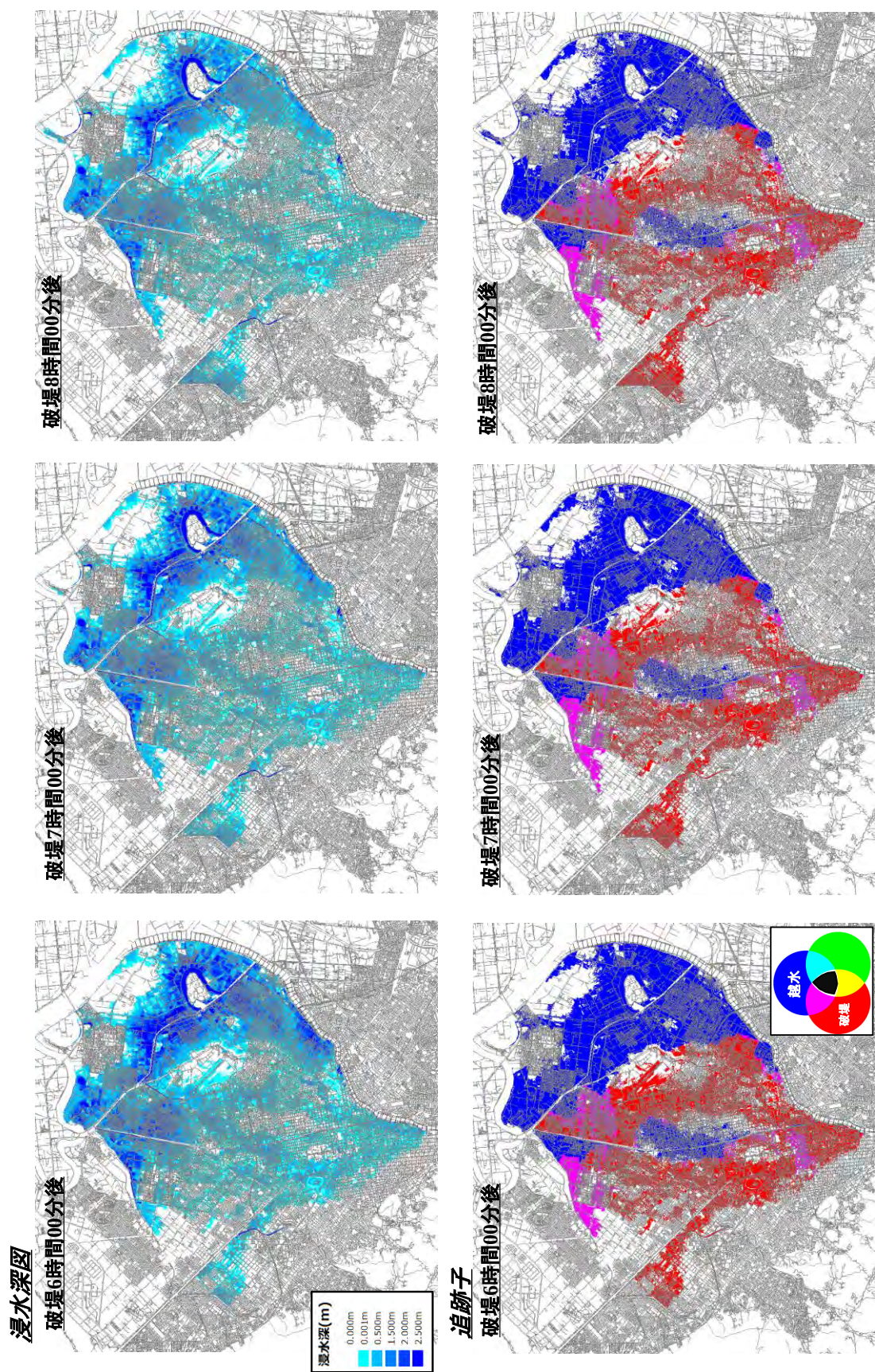


図 4.2.13(9) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

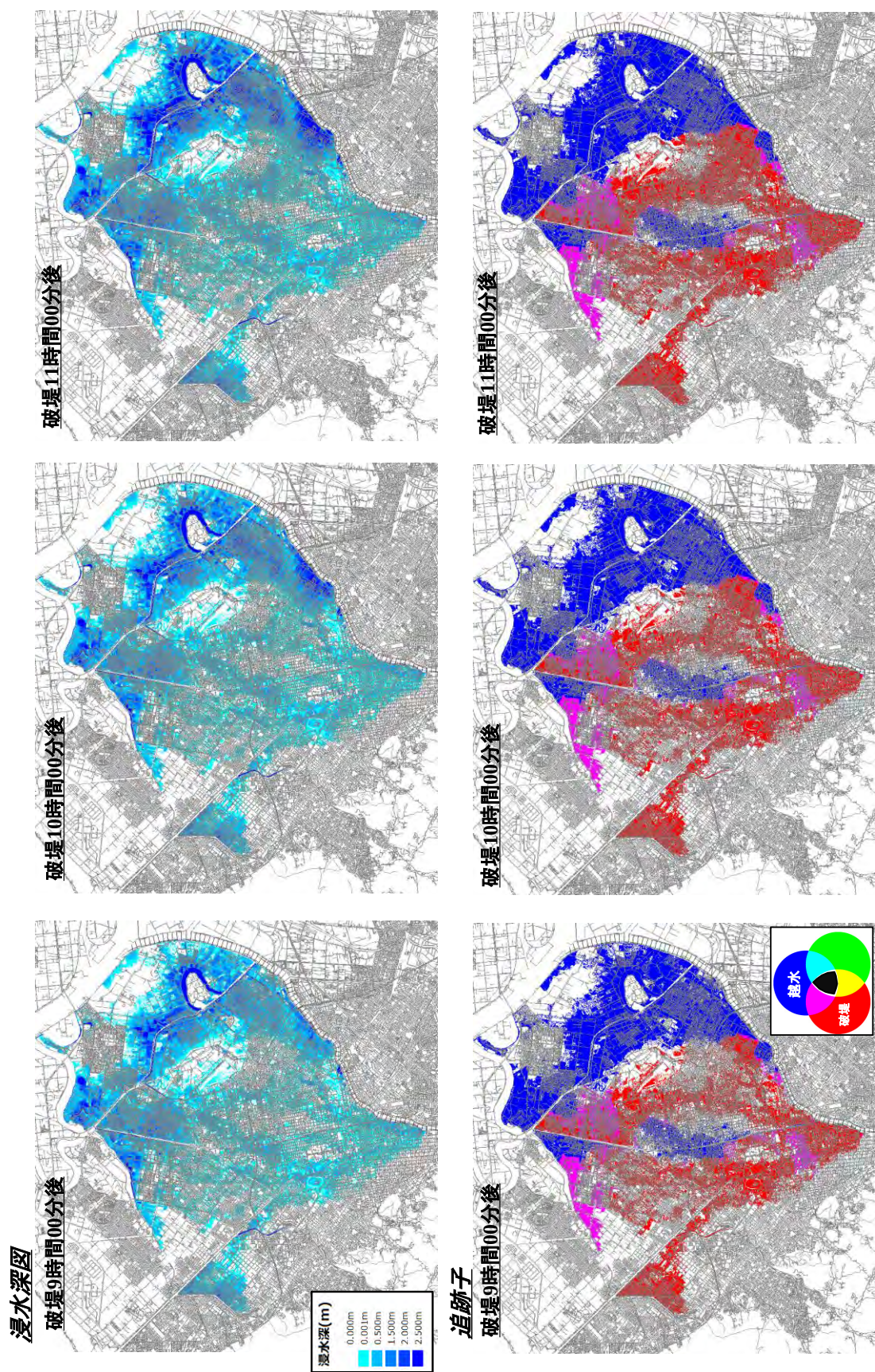


図 4.2.13(10) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定 (時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ)

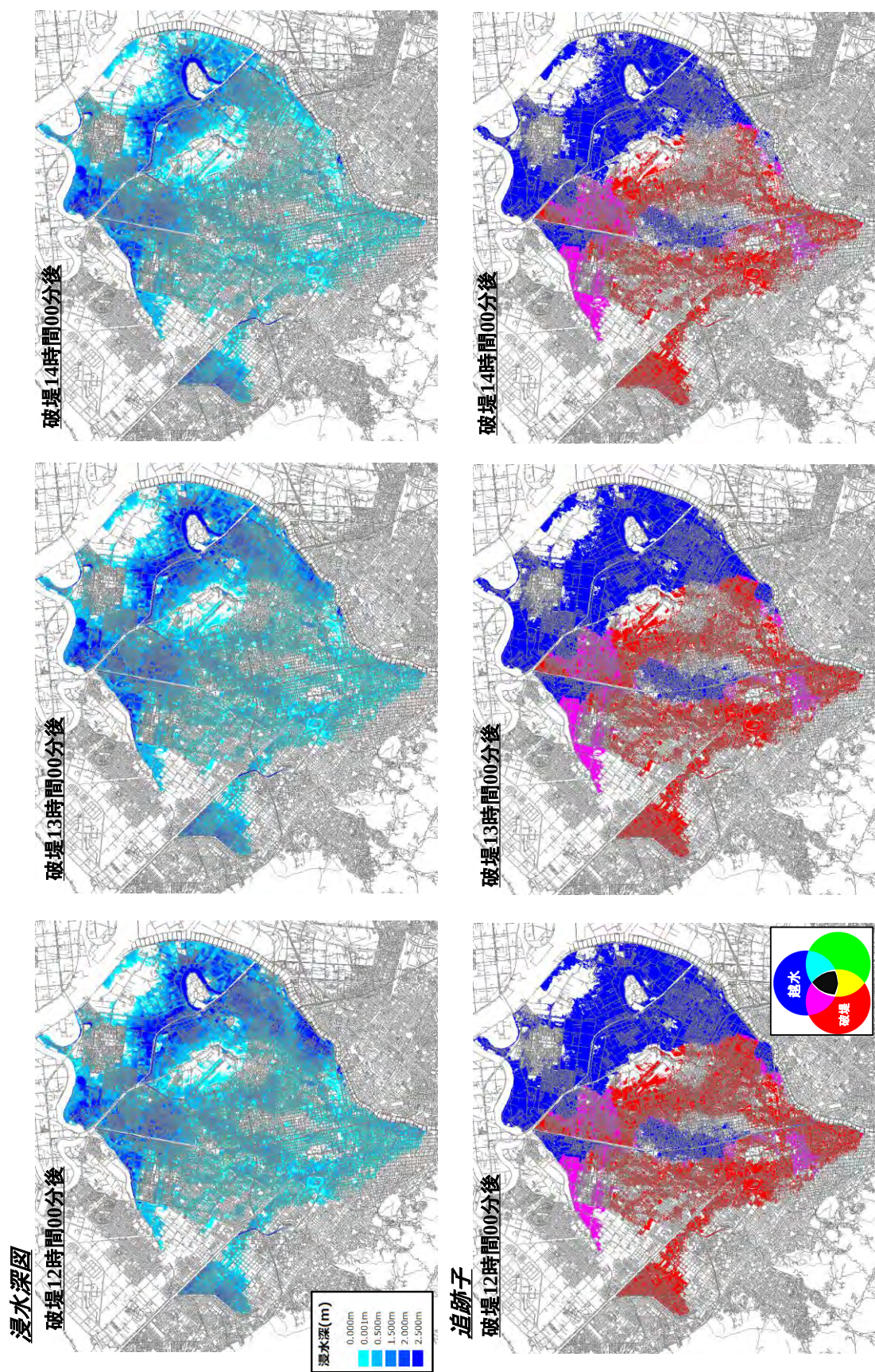


図 4.2.13(11) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

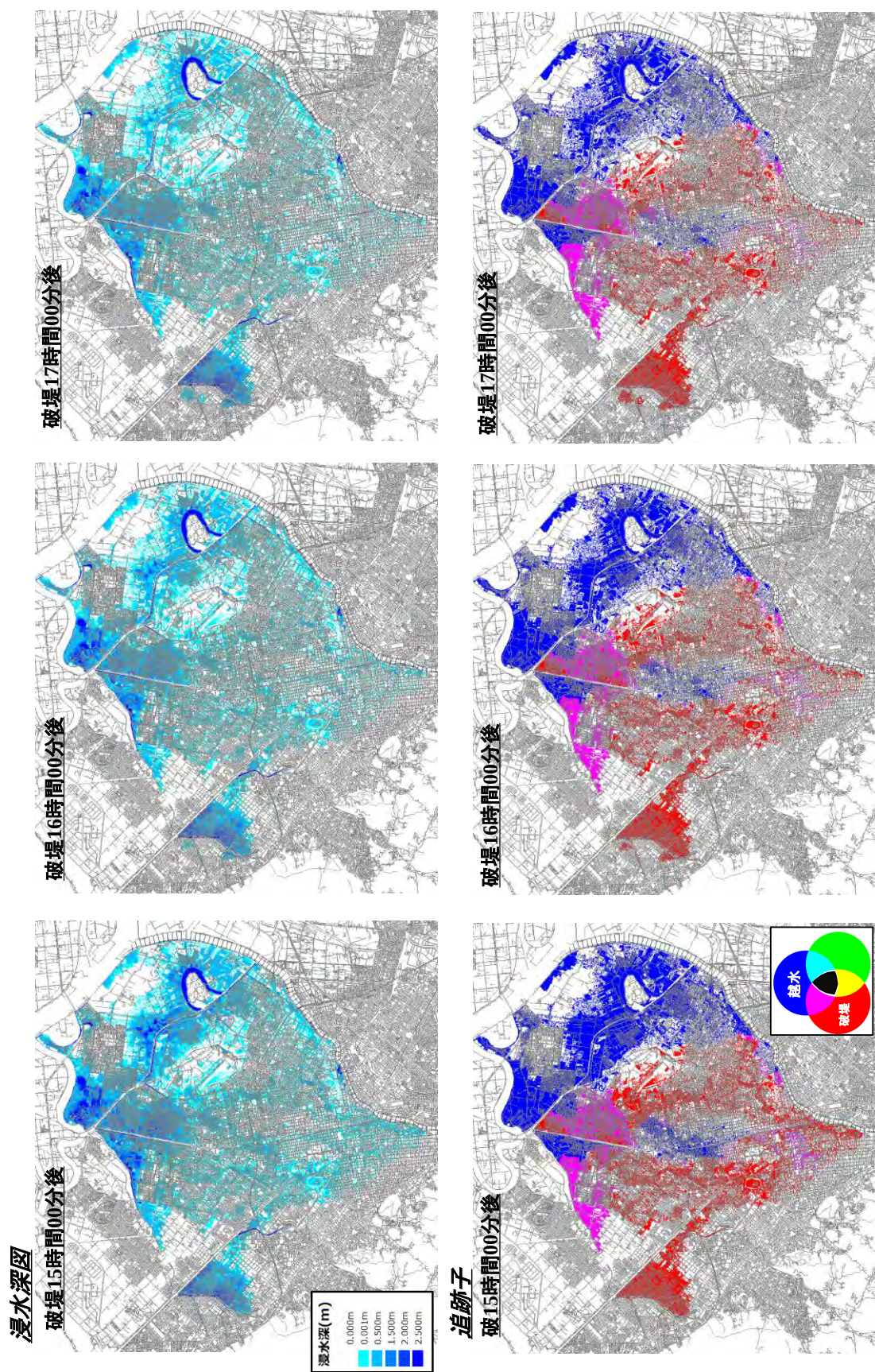


図 4.2.13(12) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

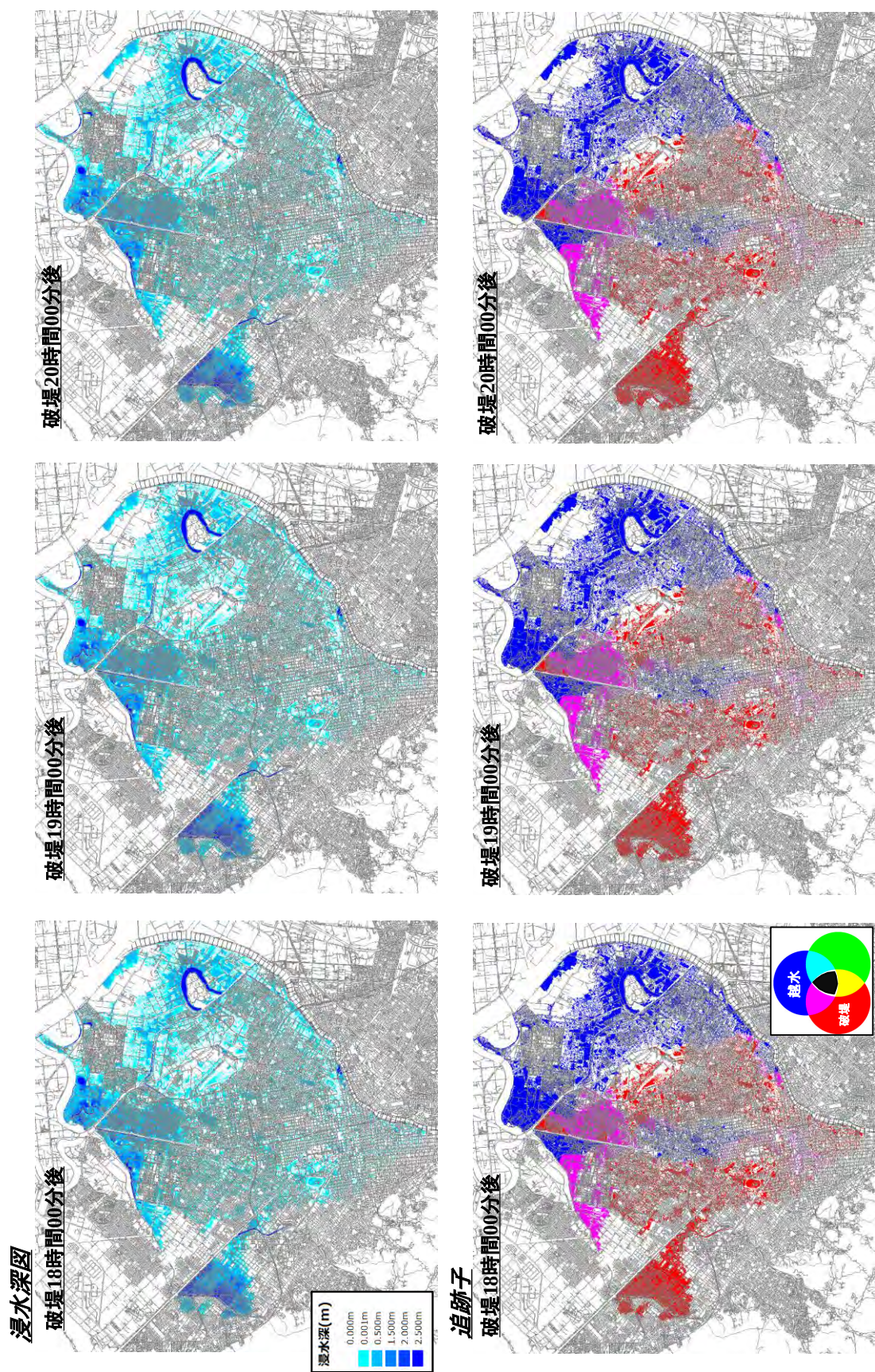


図 4.2.13(13) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

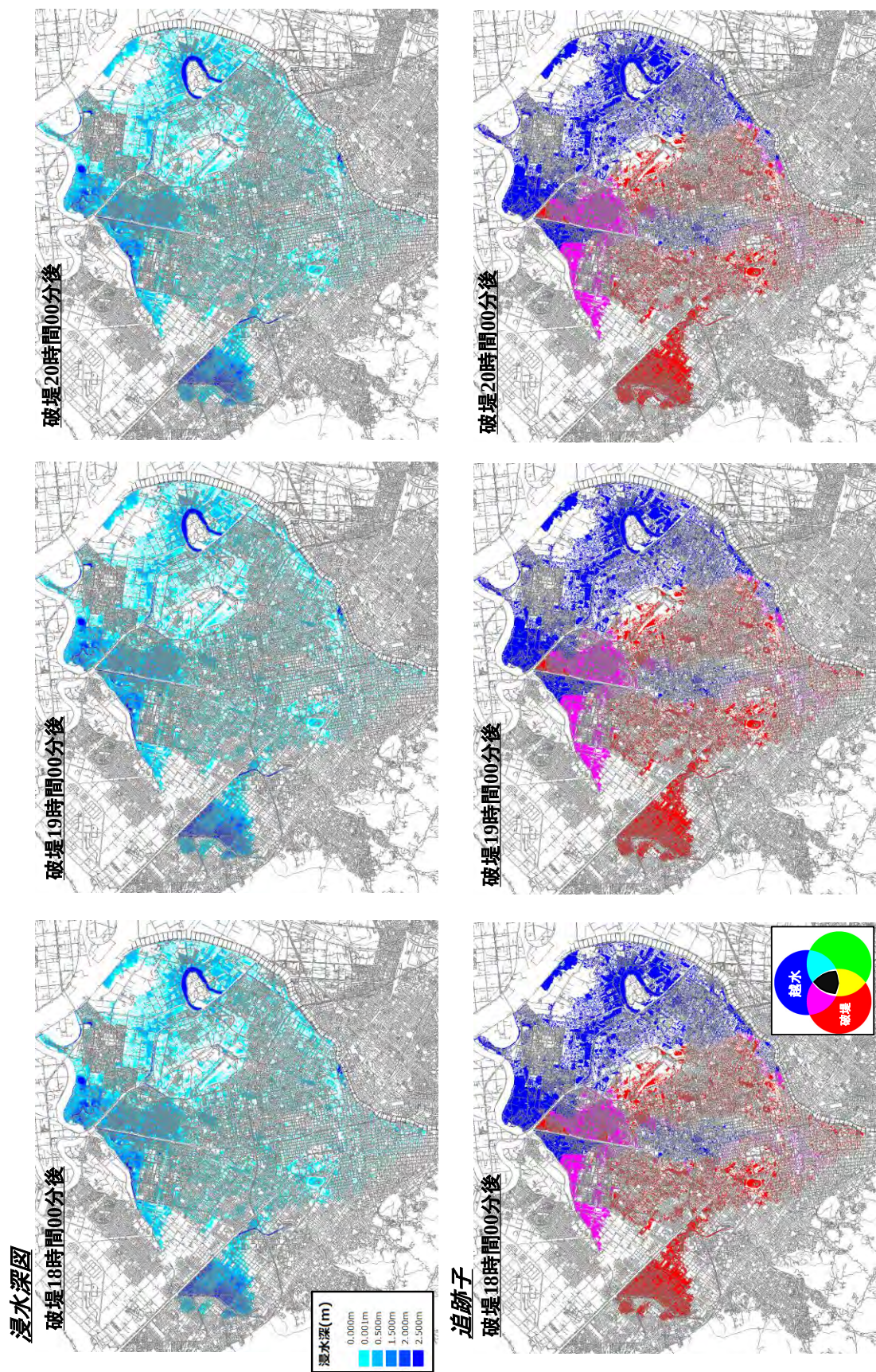


図 4.2.13(14) 追跡子を用いた浸水発生要因の特定（時系列浸水深図 想定最大規模：外水氾濫のみ）

4.3 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

内水氾濫と外水氾濫の両方が想定される場では、下水道管理者や河川管理者等の関係機関による連携した浸水対策が必要である。それぞれが整備目標とする外力規模(計画降雨規模)や施設規模は異なるため、施設の超過外力規模も含む様々な降雨状況下での浸水リスクや浸水メカニズムを把握し、効率的・効果的なハード・ソフト対策を立案することが重要である。また、小林らは、降雨・流出量には観測手法(地上観測、レーダ観測)や観測位置による変動幅があり、不確実性を有していることを指摘している。整備目標の設定や避難判断等の浸水対策を実施する際には、このような不確実性の存在を考慮することが重要である。

本研究では、市街地を河川が貫流し、下水道網が整備されている札幌市をモデルケースとして、山地及び市街地の降雨流出、河道内洪水追跡、地表及び地下施設における氾濫流の挙動を一体的に解析する内外水同時氾濫解析モデルを構築し、下水道や河川で整備目標としている降雨量と降雨強度をもとに設定した様々な降雨外力条件で氾濫解析を行い、総雨量・降雨強度と浸水被害の関係及び被害特性を分析した。また、降雨及び流出モデルの不確実性を考慮した氾濫解析を行い、浸水被害への影響を分析するとともに、不確実性の幅を持った浸水リスクマップを作成し、関係機関が浸水対策の方針や優先度を判断するための手法を提案した。

4.3.1 不確実性を考慮した浸水危険度評価

降雨・流出の不確実性を考慮した内外水同時追跡氾濫解析を行い、浸水被害の変化特性、不確実性の影響を分析し、浸水危険度評価の評価手法及び対策優先度の設定手法を検討した。

(1) 内外水氾濫形態を踏まえた外力設定

降雨外力は、①内水氾濫が卓越すると想定される短時間強雨時と②外水氾濫が卓越すると想定される総雨量増加時を想定して設定した。降雨量は、平成 26 年 9 月洪水実績規模から想定最大規模までの 5 ケース、降雨継続時間は大流域及び小流域の降雨特性を評価するため 3 時間から 48 時間までの 5 ケースとし、計 25 ケースを設定した(図 4.3.2 参照)。対象とする降雨波形は、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 月下旬型降雨とした。モデルに与える降雨は、同じ降雨量に対して継続時間を変更し降雨強度を変えるため、図 4.3.2 に示すように対象波形の最大(3,6,12,24,48)時間雨量の期間を対象とした。

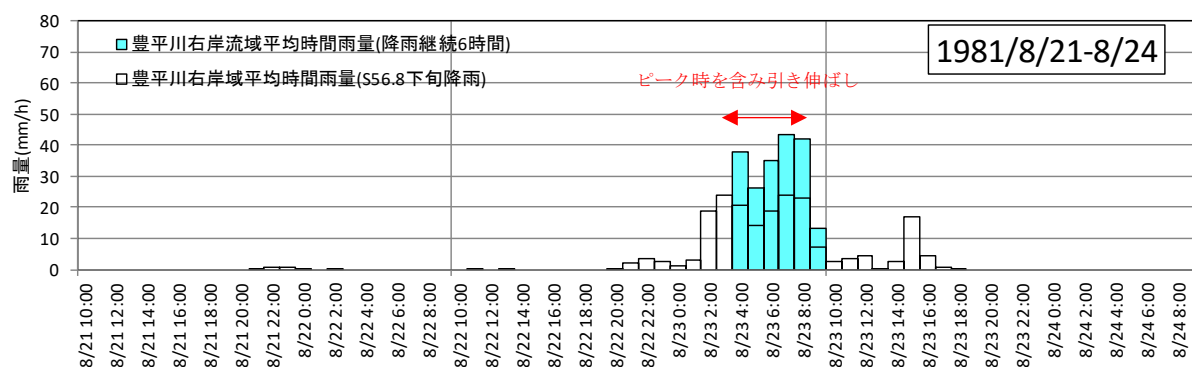


図 4.3.1 降雨外力の設定方法の例

No.	規模	降雨量 (mm)	降雨継続 時間
1	平成26年9月洪水 実績規模	雁来地点流域平均雨量 80.6mm (1雨降雨:11hr)	3hr
2			6hr
3			12hr
4			24hr
5	下水道計画規模	降雨強度:35mm/h (降雨強度式による 24hr雨量:142mm)	48hr
6			3hr
7			6hr
8			12hr
9	戦後最大規模	雁来地点流域平均雨量 250mm/3日	24hr
10			48hr
11			3hr
12			6hr
13	計画規模	雁来地点流域平均雨量 310mm/3日	12hr
14			24hr
15			48hr
16	想定最大規模	雁来地点流域平均雨量 406mm/3日	3hr
17			6hr
18			12hr
19			24hr
20			48hr
21			3hr
22			6hr
23			12hr
24			24hr
25			48hr

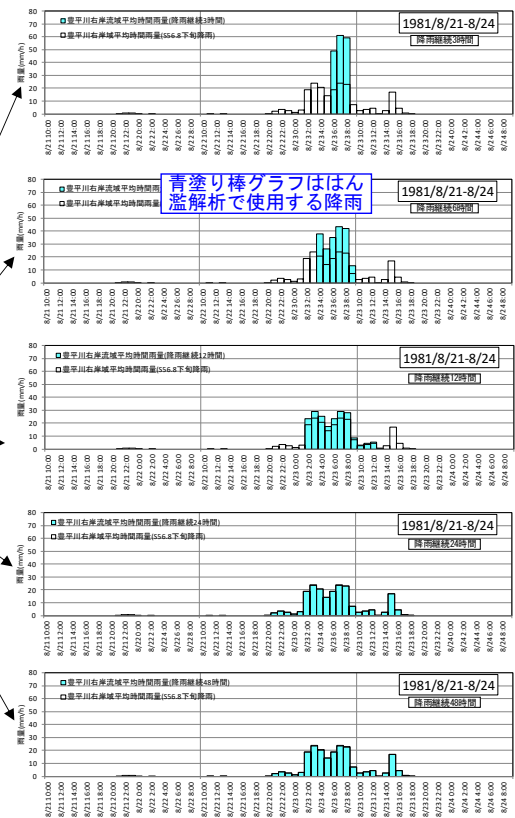


図 4.3.2 内外水氾濫形態を踏まえた外力設定

4.3.2 被害発生特性分析

図 4.3.3 及び図 4.3.4 に豊平川右岸域における総降雨量，降雨強度，被害額の関係を示す．被害額，想定死者数は，治水経済調査マニュアル案，水害の被害指標分析の手引きに基づき算定した．総降雨量と降雨強度の増加に伴い被害は増加し，河川の越水により被害額が大きくなる傾向がみられるが，図 4.3.4 の右図では総雨量は約 160mm と少ないものの降雨強度が 60mm/h と大きいため豊平川の氾濫が発生しなくても約 800 億円の被害が生じている．

一方，図 4.3.4 の右図では総雨量 300mm と大きい，降雨強度が 35mm/h と小さいために被害額が 200 億程度となっている．浸水被害は総雨量だけではなく，降雨強度の影響も大きいことがわかる．豊平川右岸域においては，床上浸水が発生する被害額増加の変化点がある．また，総雨量 250mm 以上，降雨強度 50mm/h 以上を境に死者発生を伴う大きな被害が発生する変化点を確認できる．被害の変化点とその要因に着目し，被害変化点を遅らせる対策を取ることが重要である．

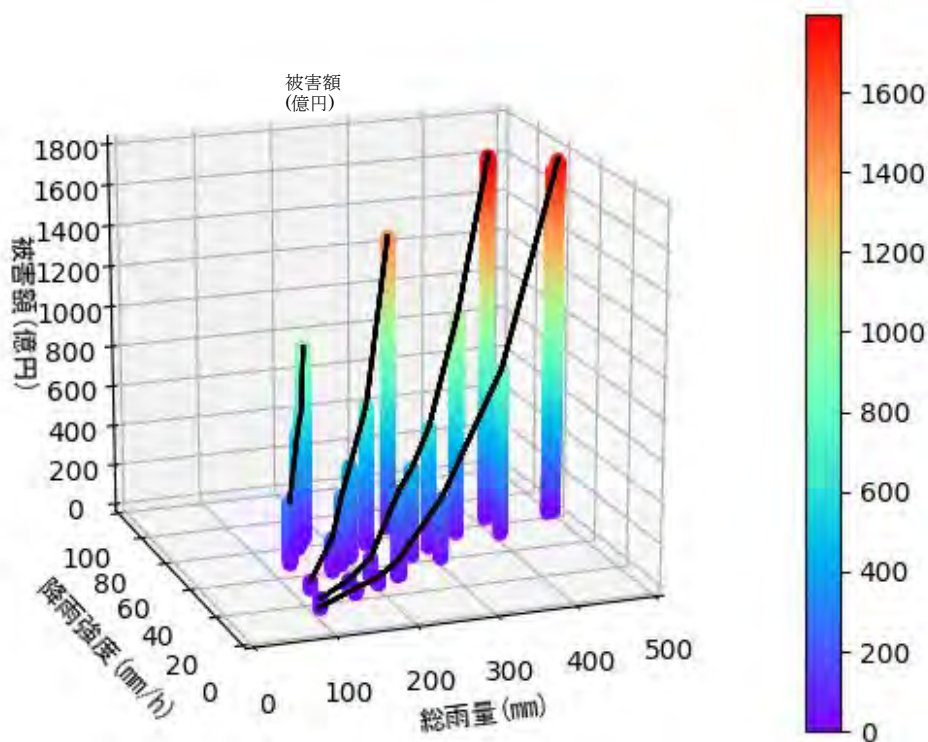


図 4.3.3 豊平川右岸域の総雨量～降雨強度～被害額の 3D 図

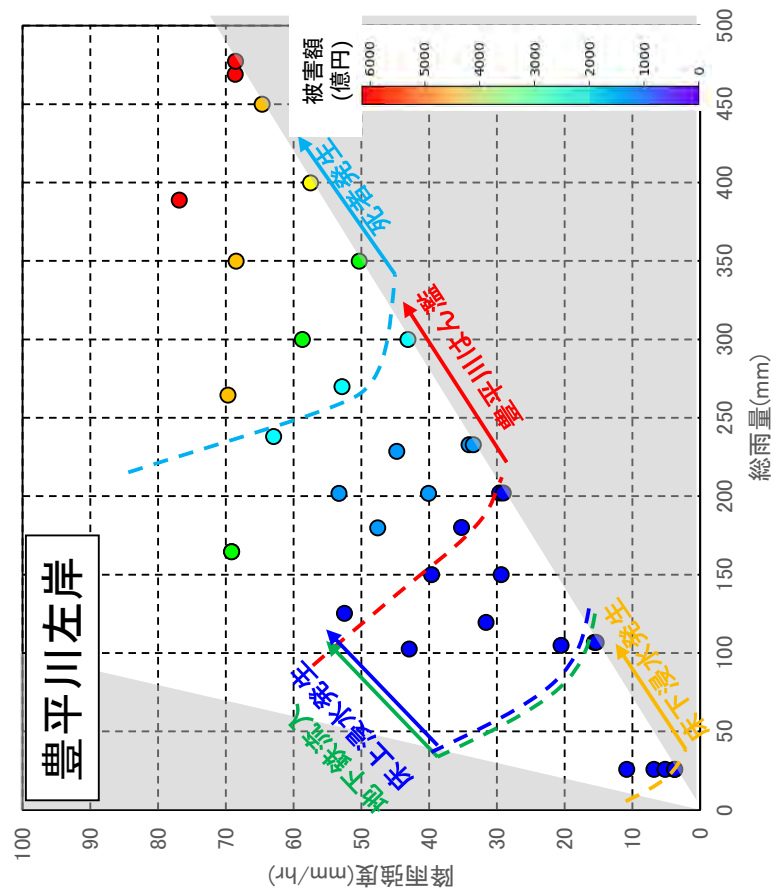
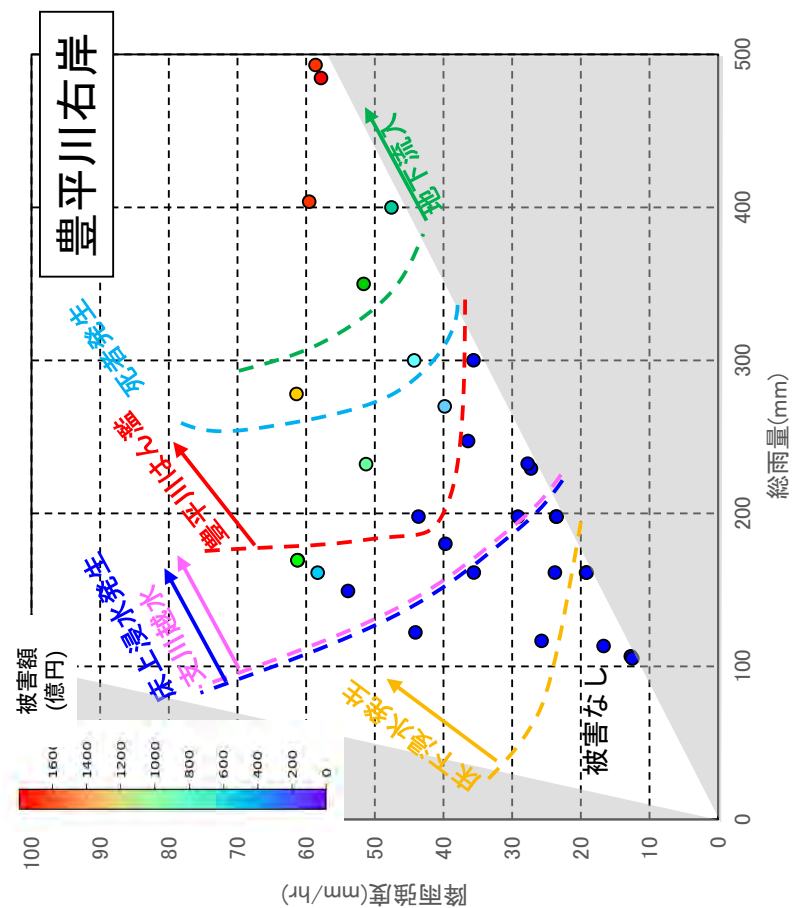


図 4.3.4 豊平川の総雨量～降雨強度～被害額の関係

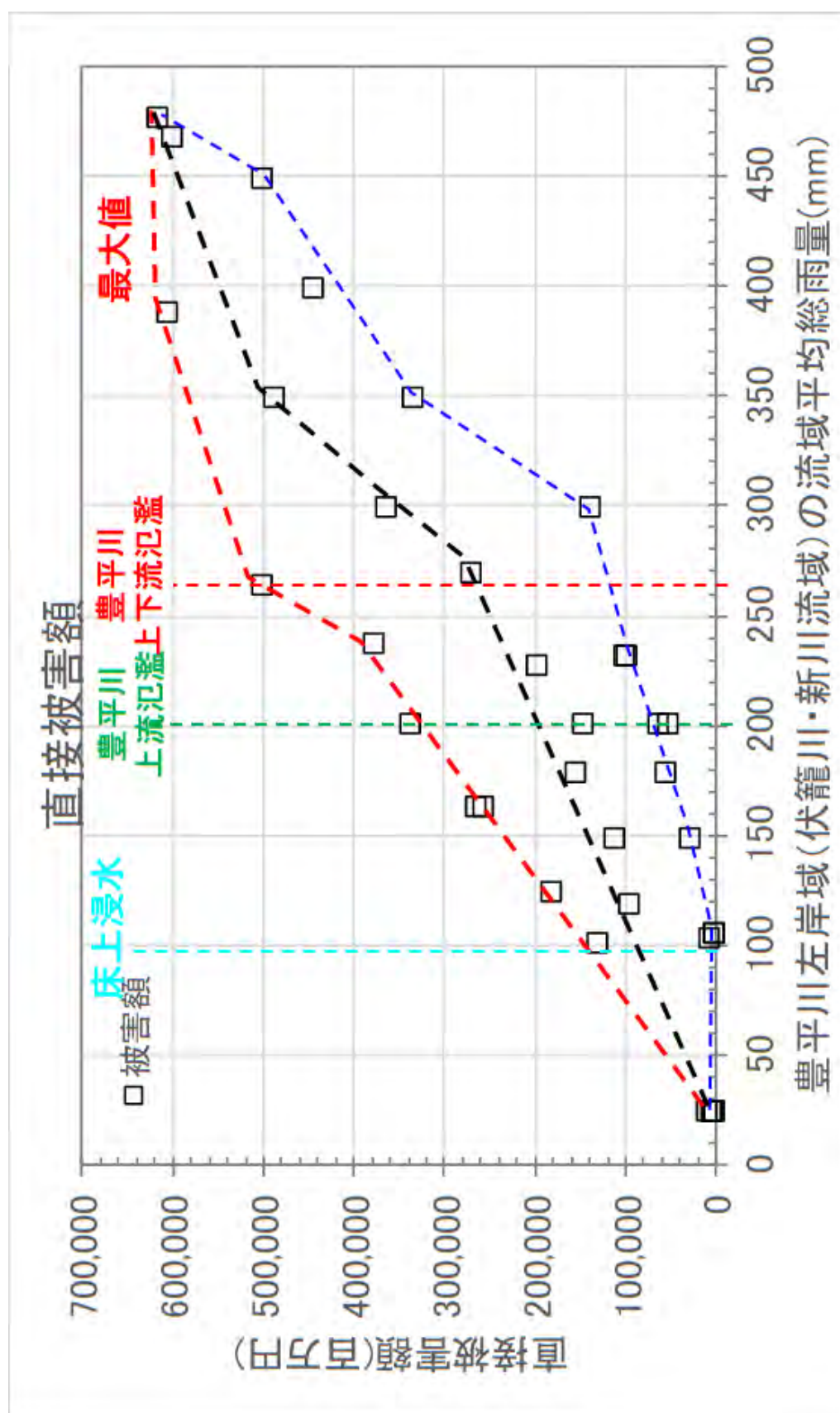


図 4.3.5 総雨量に対する被害特性の変化

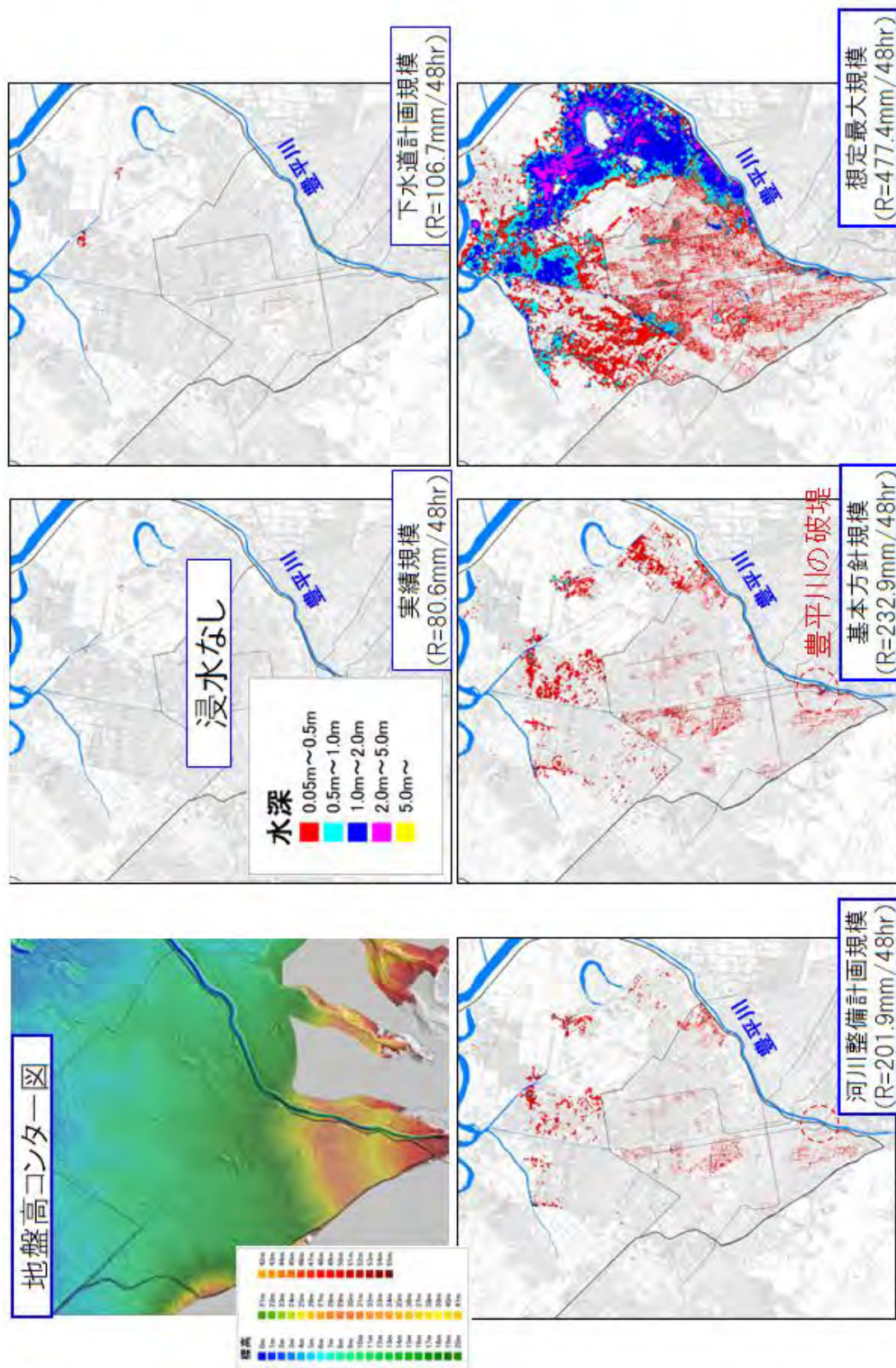


図 4.3.6(1) 内外水氾濫形態を踏まえた各外力に対する氾濫解析結果

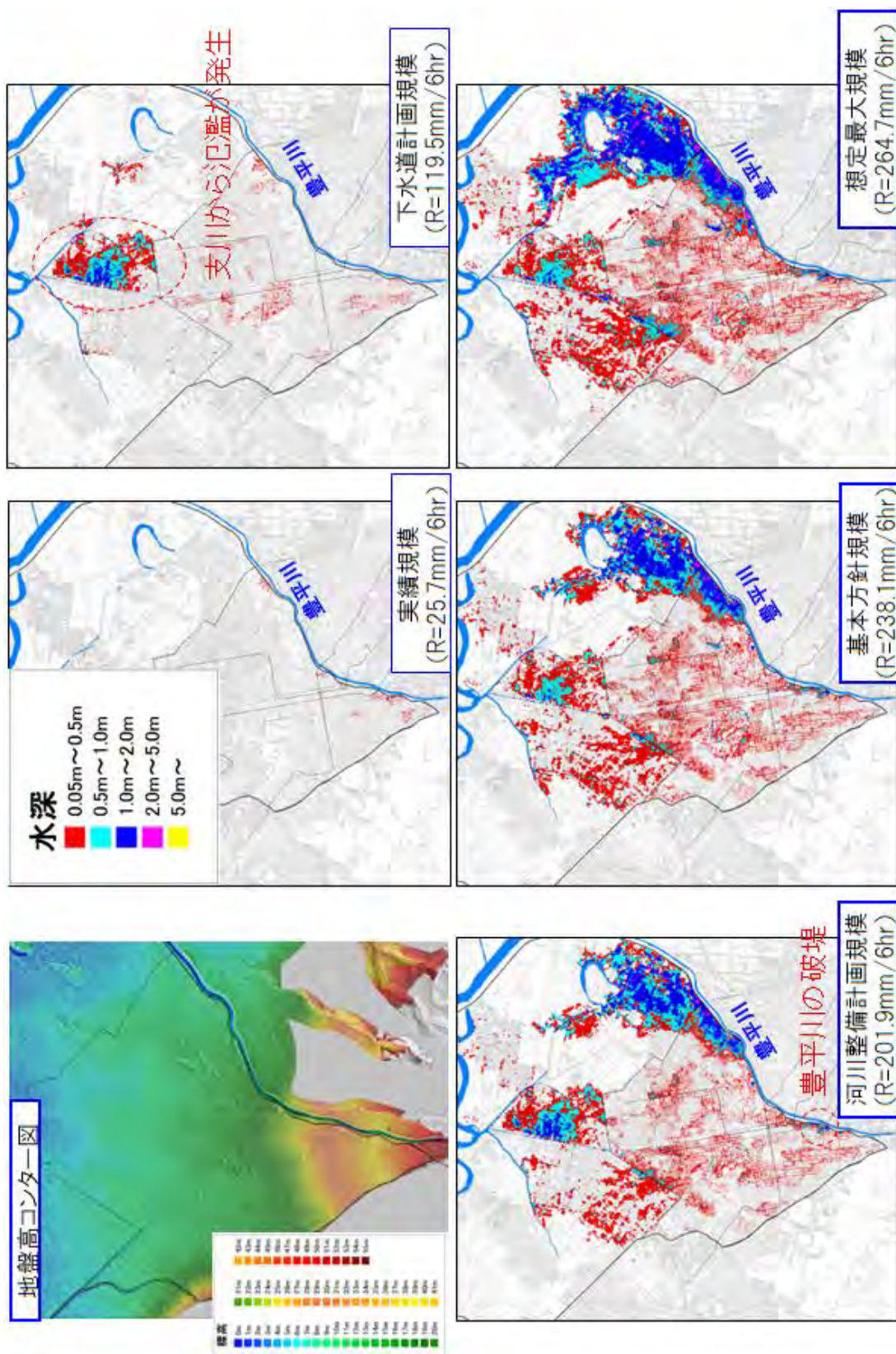


図 4.3.6(2) 内外水氾濫形態を踏まえた各外力に対する氾濫解析結果

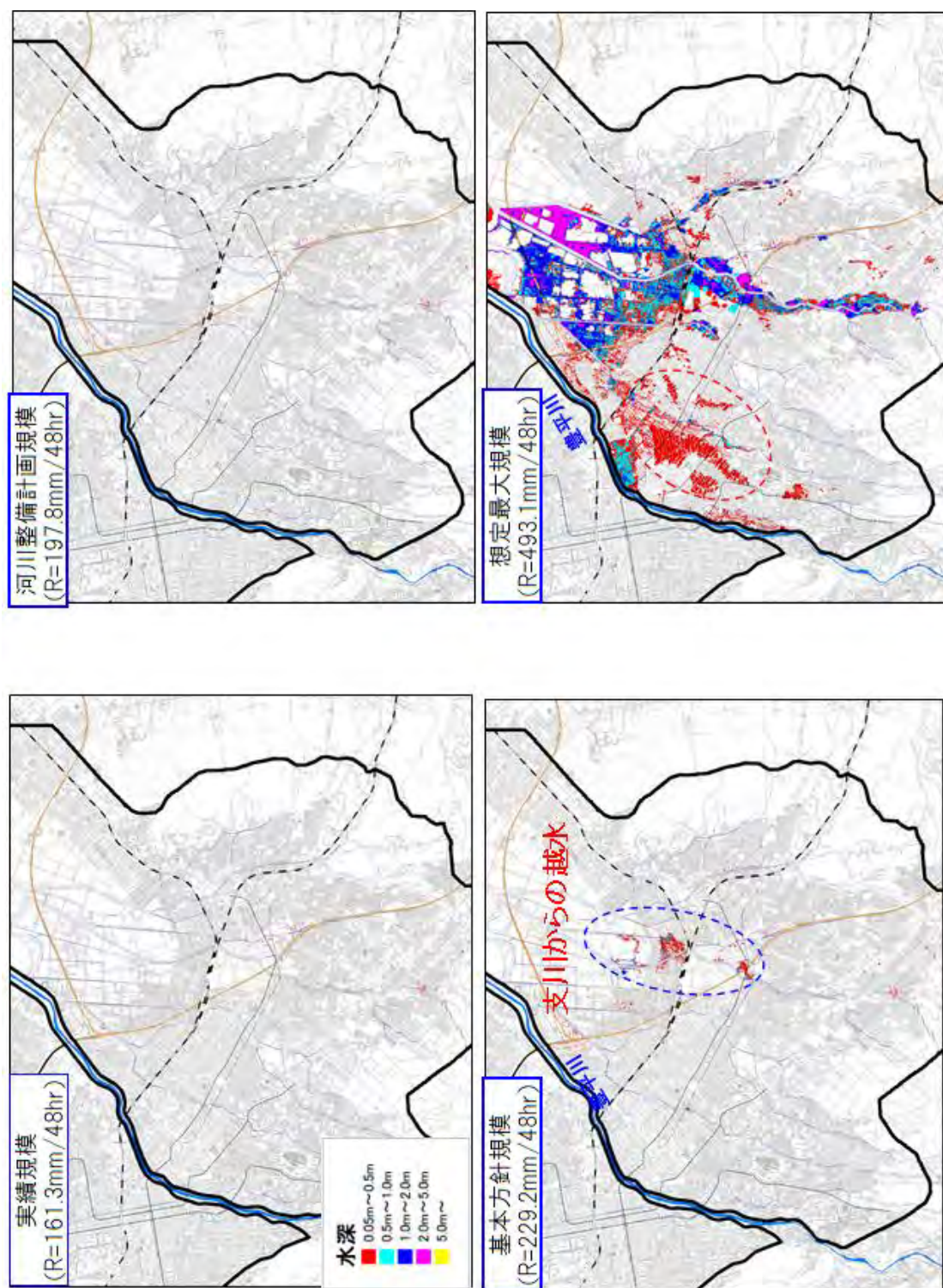


図 4.3.6(3) 内外水氾濫形態を踏まえた各外力に対する氾濫解析結果

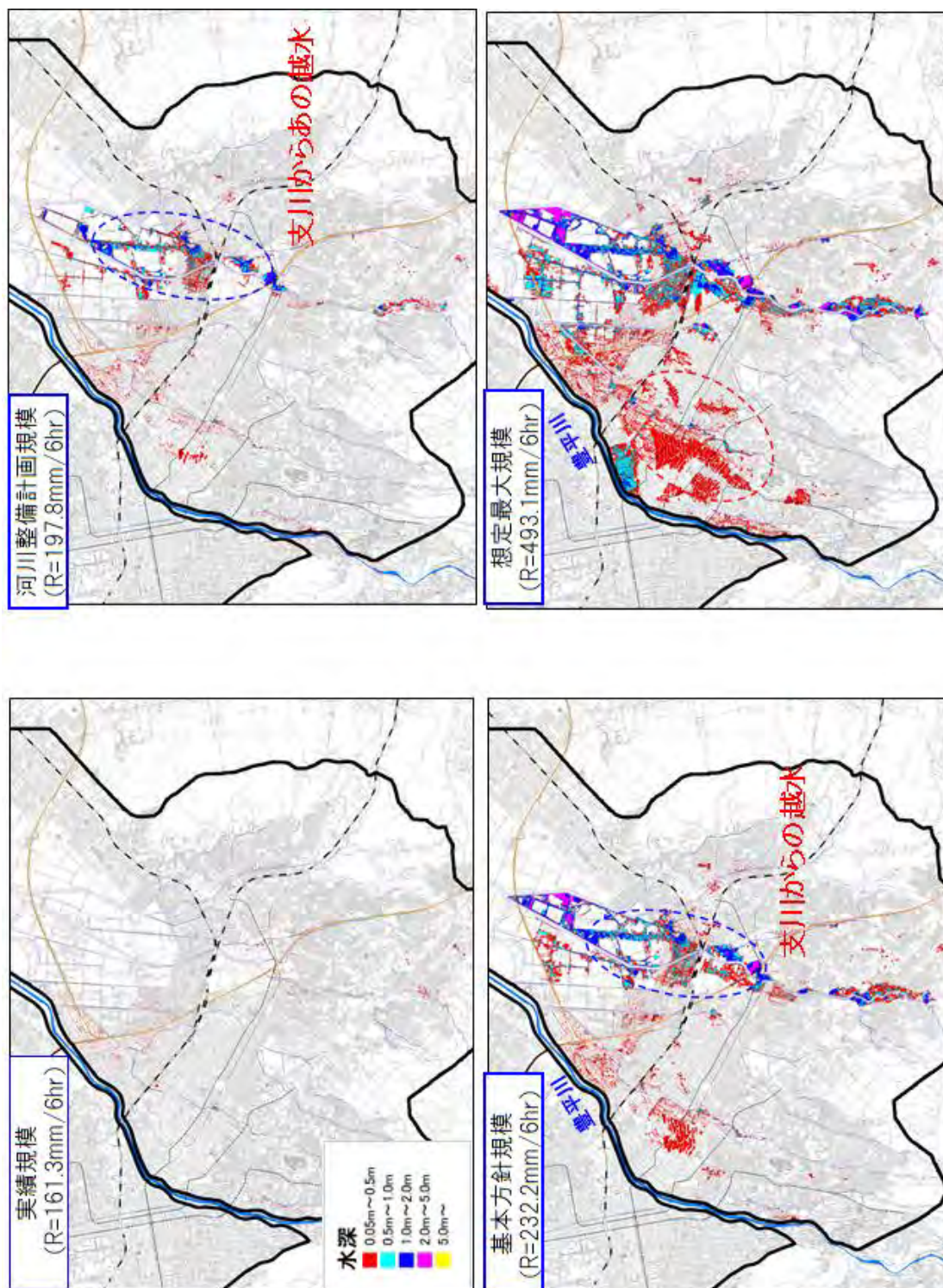


図 4.3.6(4) 内外水氾濫形態を踏まえた各外力に対する氾濫解析結果

4.3.3 不確実性を考慮した浸水被害の変化

外力及び解析モデルは不確実性を含んでいるため、以下の 3 つの不確実性を考慮し氾濫計算を実施した。以下に、想定した不確実性の条件を示す。降雨観測値の不確実性を考慮した条件での浸水被害状況の変化を比較すると、不確実性を考慮した戦後最大規模降雨時の被害額は不確実性を考慮しないケースの想定最大規模時の被害額を上回っている(図 4.3.8 参照)。また、分布型流出モデル定数の不確実性による被害額への影響も大きく、中間規模(300mm)以上では被害額は約 1.5 倍に変化する(図 4.3.9 参照)。一方、下水道流域の流出係数の不確実性による影響は大きくない(図 4.3.10 参照)。

①降雨観測値の不確実性：降雨観測値は、地上雨量計の観測値であり空間的な不確実性、観測機器の特性等の不確実性を含んでいる。平成 26 年 9 月 11 日の洪水時の地上雨量計観測値と XRAIN の観測値(図 4.3.7)を比較し、外れ値を除いて上下限が含まれるように降雨量を 0.5～1.4 倍した条件を設定した。

②分布型流出モデルの定数：分布型流出モデルのパラメータは、洪水毎に変化すると考えられたため、平成 26 年 9 月洪水で同定したパラメータと既往最大の昭和 56 年 8 月洪水で同定したパラメータの 2 ケースの条件を設定した。

③下水道流域の流出係数の不確実性：下水道流域の流出係数は、 $\pm 0.05 \sim 0.10$ 幅を持って設定されている(表 4.3.1 参照)。各パラメータの上限値と下限値を用いた条件を設定した。

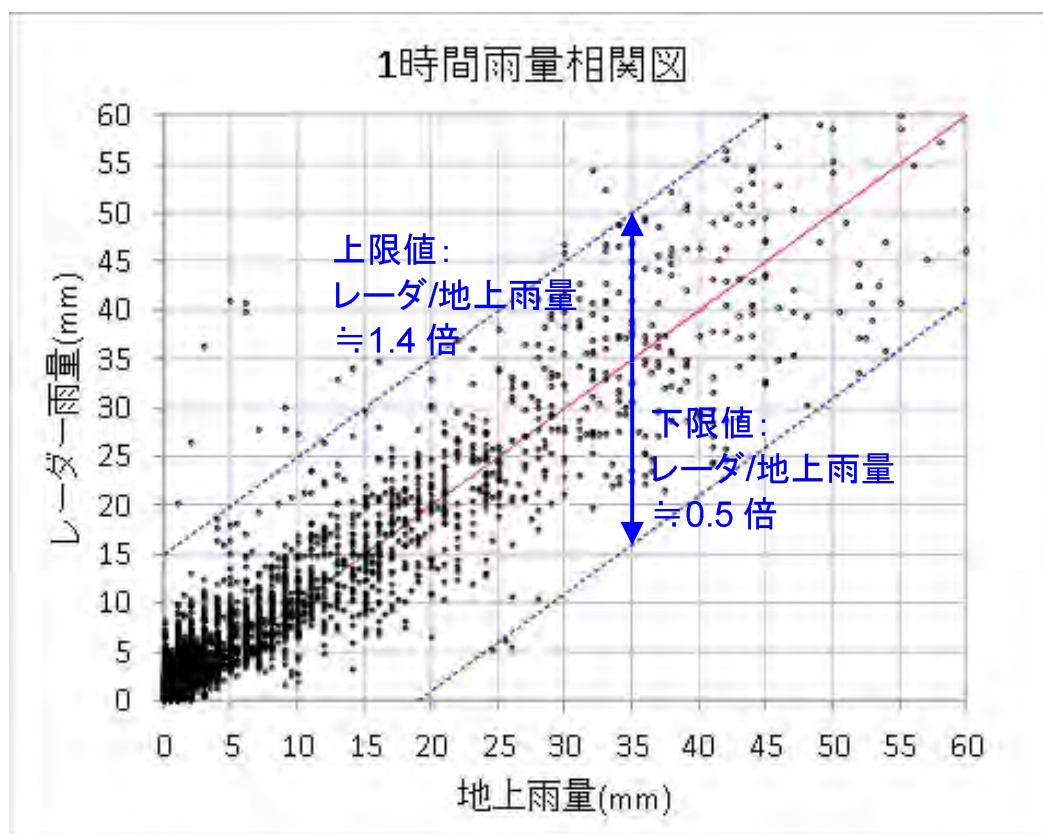


図 4.3.7 H26.9.11 洪水の地上雨量計観測値と XRAIN の観測値

表 4.3.1 下水道流域の流出係数

工種	流出係数
屋根	0.85 ~ 0.95
道路	0.80 ~ 0.90
その他の不透面	0.75 ~ 0.85
水面	1.00
間地	0.10 ~ 0.30
芝、樹木の多い公園	0.05 ~ 0.25
勾配の緩い山地	0.20 ~ 0.40
勾配の急な山地	0.40 ~ 0.60

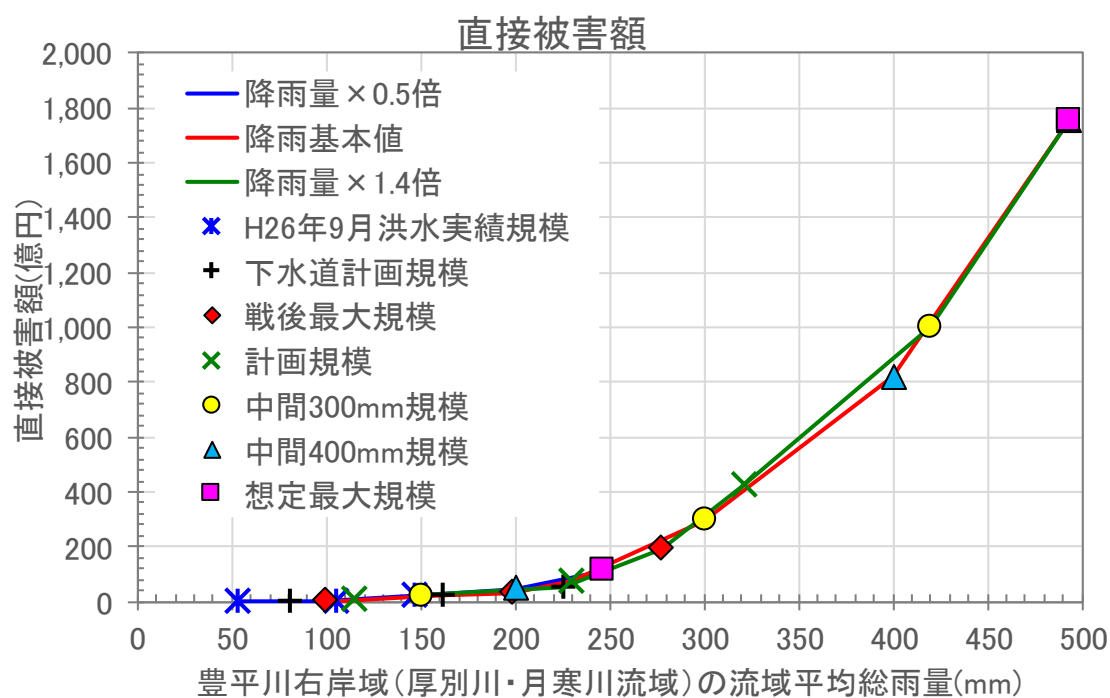


図 4.3.8 豊平川右岸域の被害額(降雨観測の不確実性)

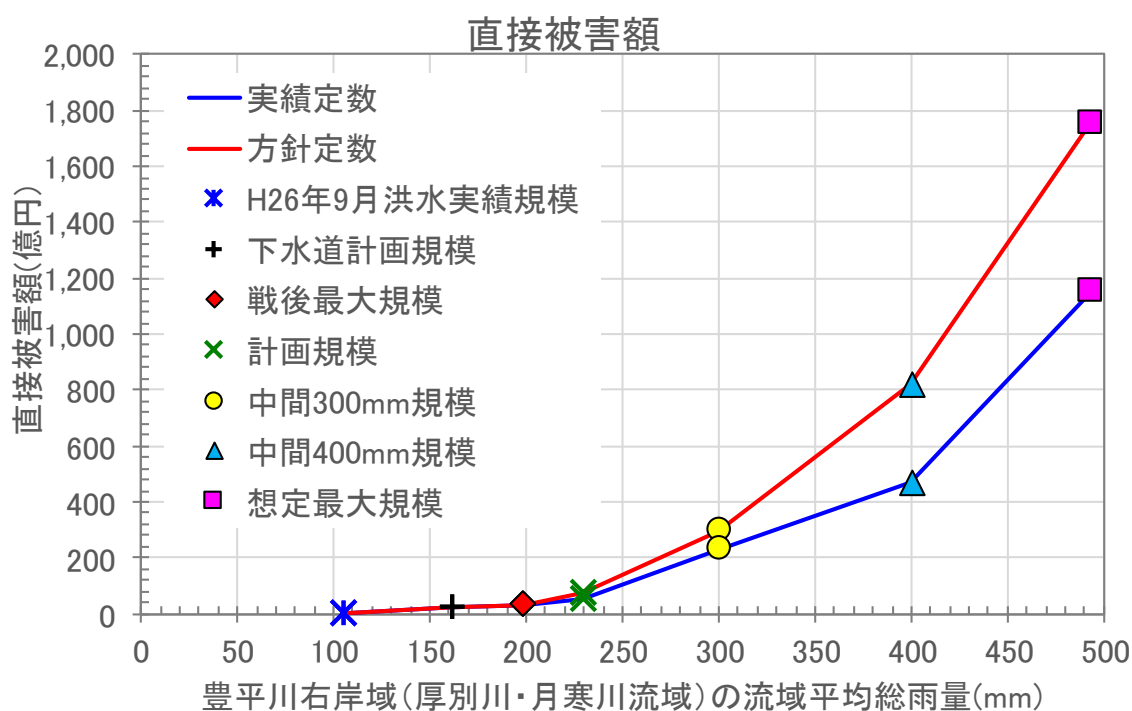


図 4.3.9 豊平川右岸域の被害額(流出モデル定数の不確実性)

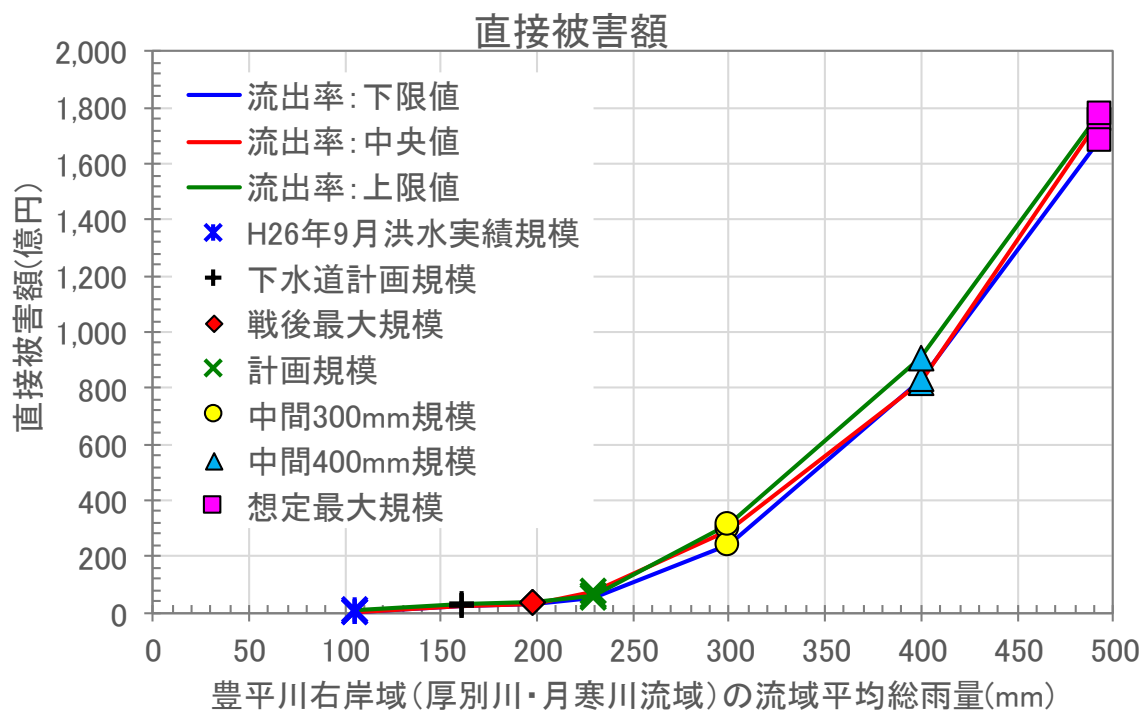


図 4.3.10 豊平川右岸域の被害額(下水道流出係数の不確実性)

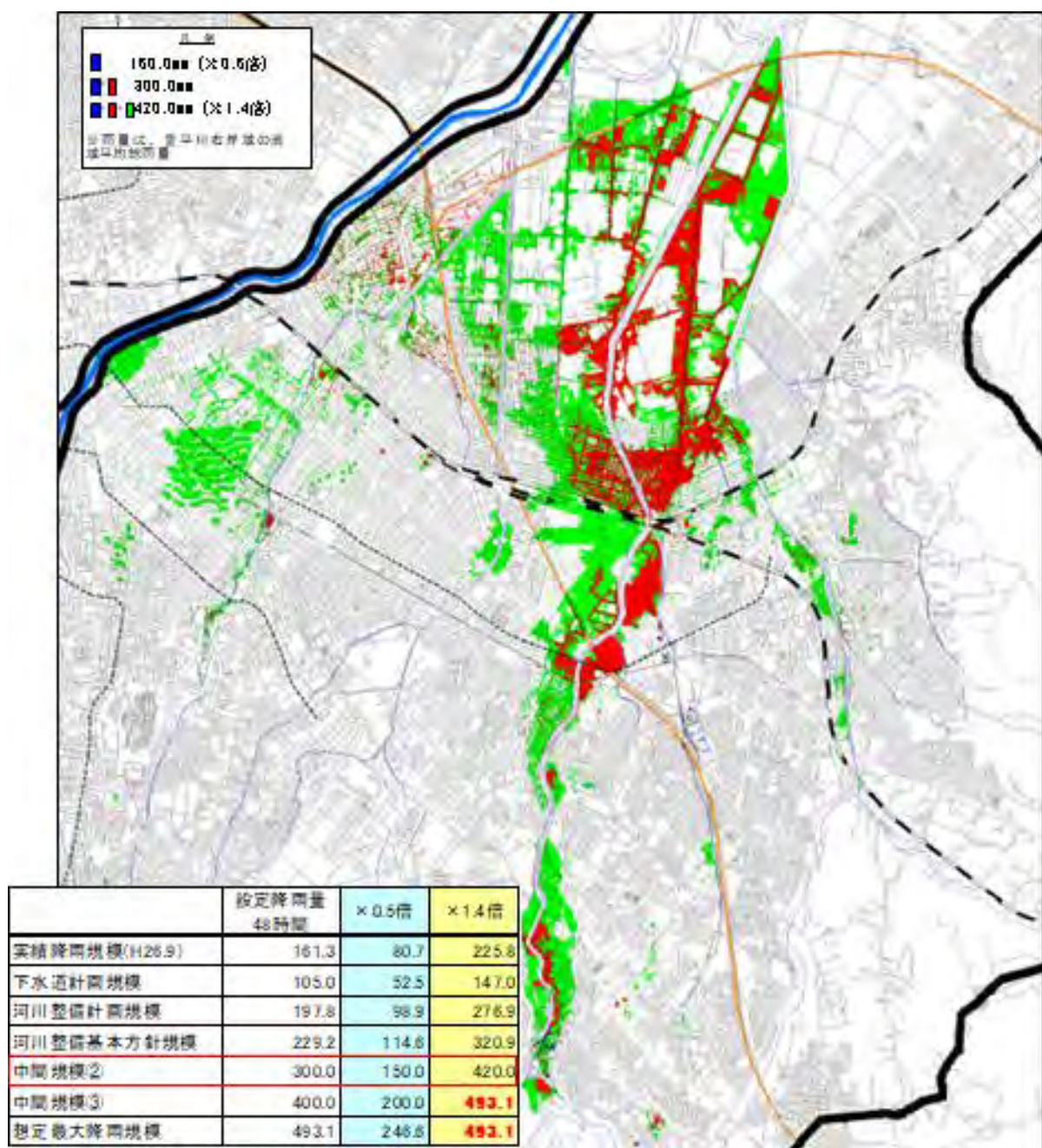


図 4.3.11 中間規模②の床上+床下浸水範囲

4.3.4 浸水危険度の評価と対策優先の設定手法の提案

不確実性を考慮した氾濫解析結果を用いて、総合的な浸水リスク評価方法と、対策優先度の設定手法を提案する。浸水による被害指標は、各種マニュアル、手引き、既往研究で提案されている。本研究では、これらの指標を統合し、車両移動困難、歩行困難、家屋の床上浸水、死者発生・家屋倒壊発生の観点から、浸水域の水位と流速の関係から図 4.3.12 に示す 5 段階のリスクランクを設定した。浸水危険度を踏まえた対策優先度の設定は、図 4.3.13 に示すフローを用いて実施した。一般の浸水対策検討では、①各施設の整備目標規模降雨を用いて浸水要因を分析し、その外力下でのリスクや被害額で優先度や対策方針を決定することが多い。本手法では②不確実性を考慮した氾濫解析結果を用いてリスクランクに幅を持たせ、不確実性を考慮しても常にリスクが高い箇所を把握し、対策箇所の優先度と対策方針を決定する手法を提案する。

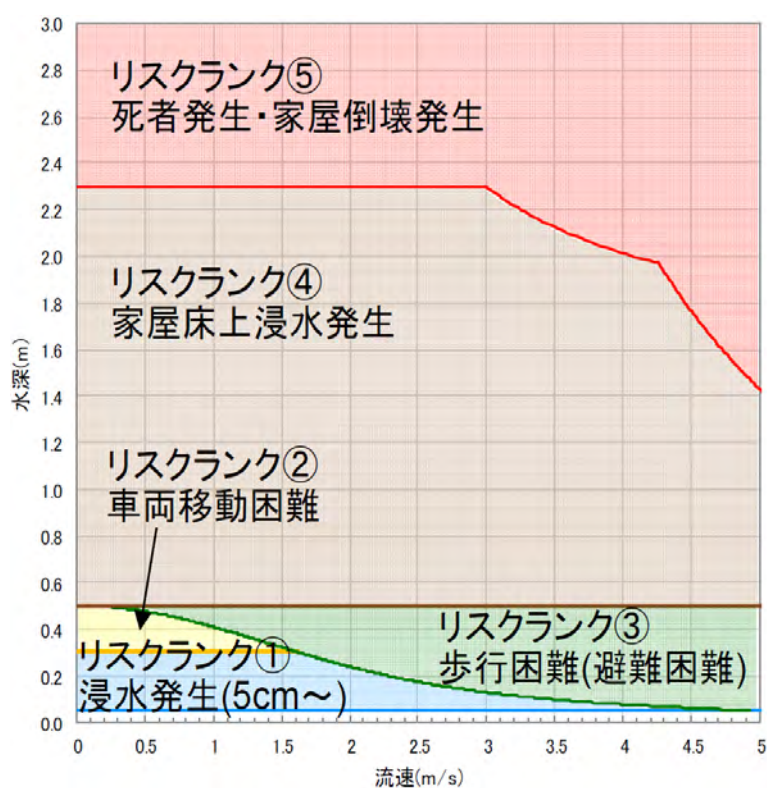


図 4.3.12 浸水深と流速を用いた浸水リスクランク

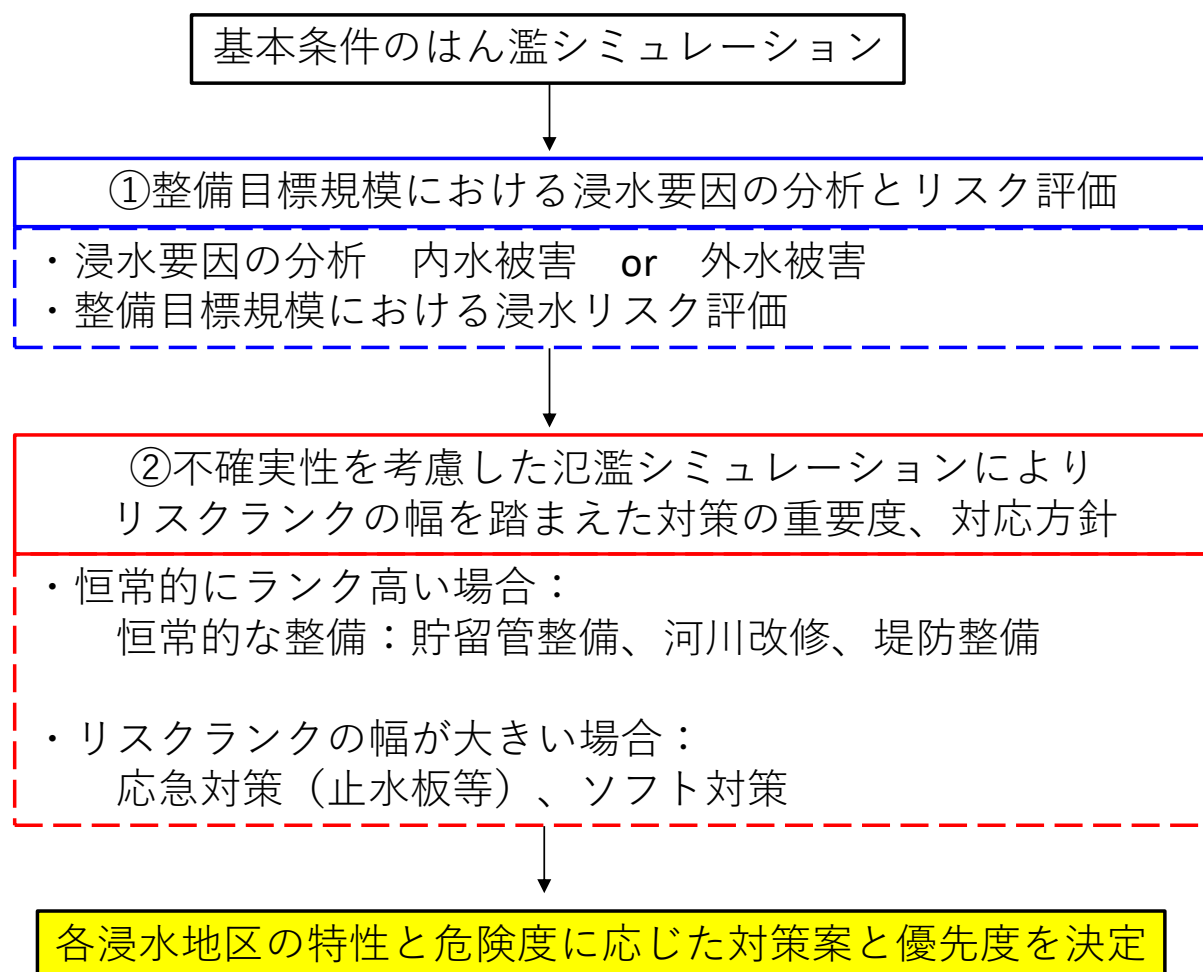


図 4.3.13 不確実性を考慮した対策優先度の設定手法

浸水被害特性の分析結果から浸水による死者が発生する総雨量 300mm・降雨継続時間 48 時間の氾濫計算結果にリスクランクを適用し、図 4.3.15 のリスクマップを作成した。A 地点は外水氾濫を要因とするリスクランク④から⑤の床上浸水が発生し、B 地点は内水氾濫を要因としたランク①の浸水被害が発生したエリアである。図 4.3.14 は、降雨観測と流出係数の不確実性によるリスクランクの変化幅を整理したものである。A 地点では不確実性を考慮した複数の降雨外力下においても常に高いリスクランクとなることから、河川改修等のハード対策の必要性が高いと考えられる。B 地点は相対的にリスクランクが低いため、ハード対策の緊急性は低く、土嚢等による応急的な対策が有効であると判断できる。本手法により降雨・流出の不確実性による浸水被害のリスク幅を評価し、これを踏まえた対策立案を実施することは有用である。

不確実性を考慮したリスクランクの設定

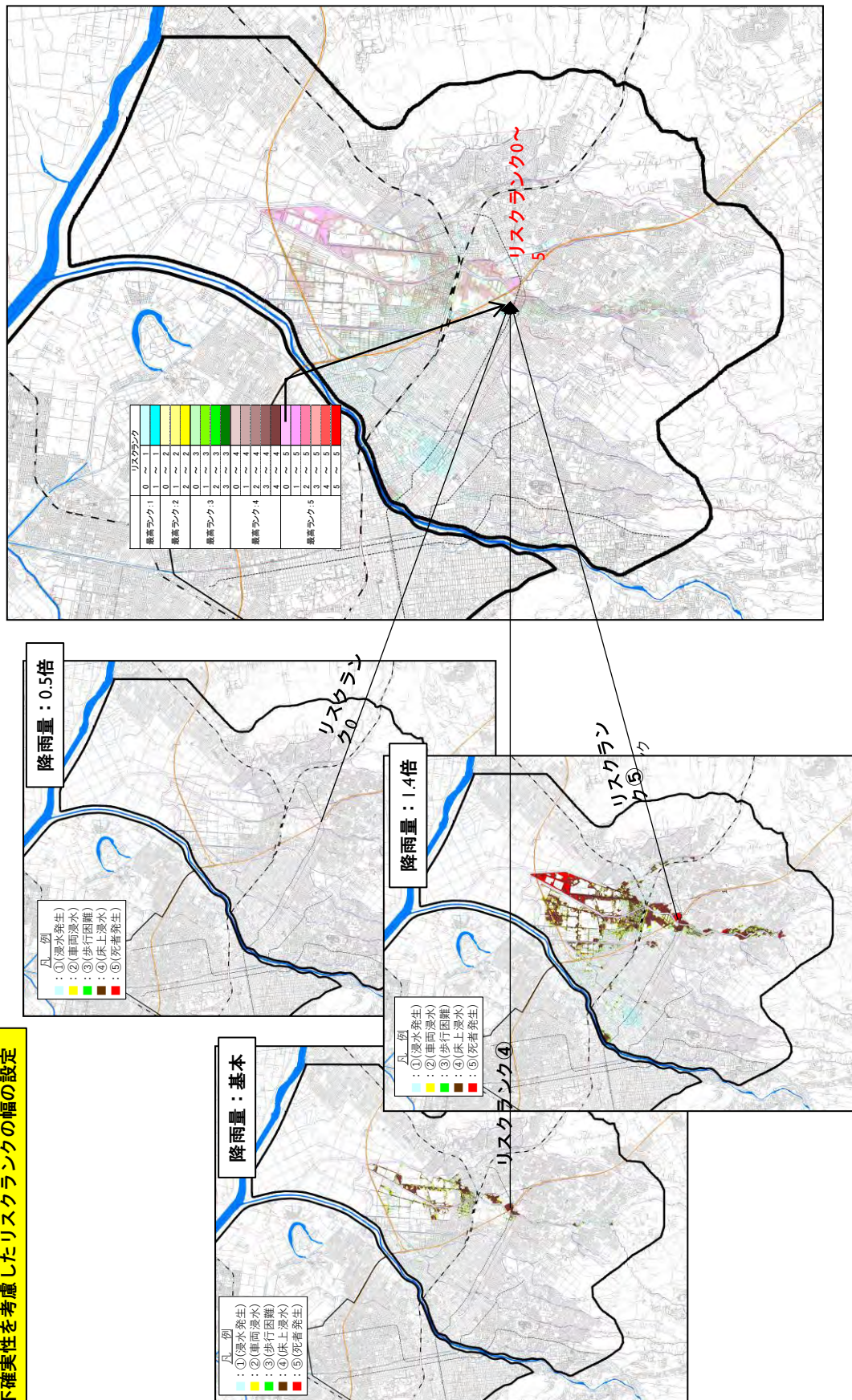
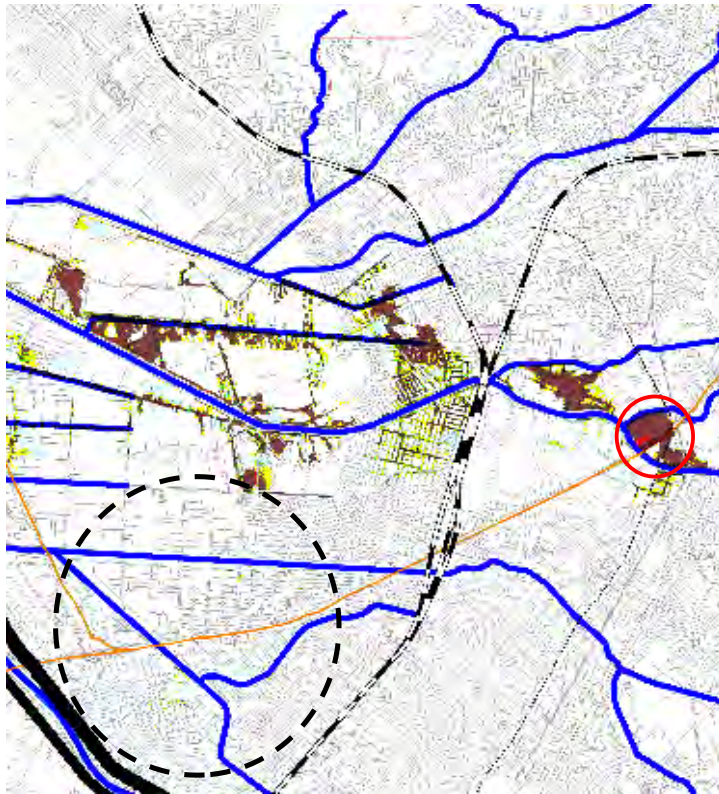


図 4.3.14 降雨量の不確実性を考慮したリスクランク

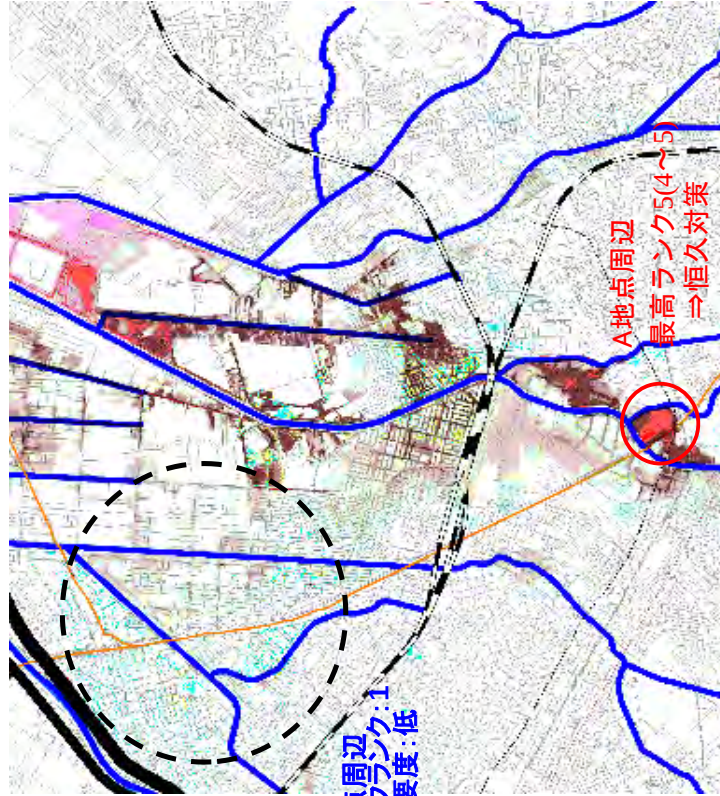
300mmのリスクマップ



リスクランク⑤(死者発生)		
リスクランク④(床上浸水)		
リスクランク③(歩行困難)		
リスクランク②(車両浸水)		
リスクランク①(浸水発生)		



300mmの不確実性を考慮したリスクマップ



リスクランク	不確実性を考慮したリスクランク					
	0	1	2	3	4	5
最高ランク5 (死者発生)						
最高ランク4 (床上浸水まで)						
最高ランク3 (歩行者困難まで)						
最高ランク2 (車両浸水まで)						
最高ランク1 (浸水発生のみ)						

図 4.3.15 不確実性を考慮したリスクマップ

第 5 章

予測降雨データを活用した内外水同時解析 による水害リスクの算出手法の提案

5. 予測降雨データを活用した内外水同時解析による水害リスクの算出手法の提案

本研究で開発した内外水同時解析モデルと降雨予測データ(d4PDF)を活用して、将来起こり得る降雨シナリオに対する水害リスクの算出を実施した。また、降雨予測データを内外水同時解析の境界条件とするうえで、時空解像度による影響を把握するための検討も実施した。

本章では、初めに予測降雨データの時空間解像度と浸水被害の関係性に関する研究内容を示して、その結果を踏まえて予測降雨データ(d4PDF)を用いた流域スケールでの浸水解析手法の提案を実施した。

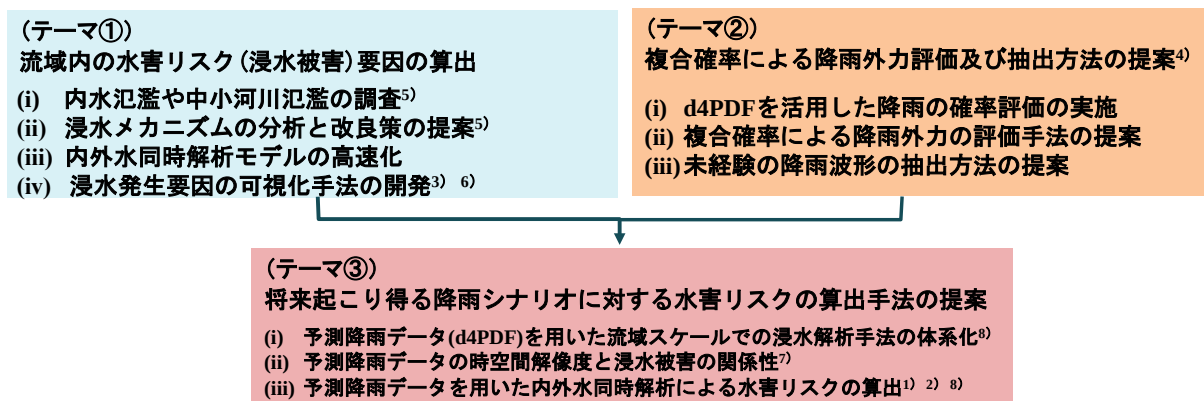


図 5.1 本研究の全体像

5.1 予測降雨データの活用に向けた降雨の時空間解像度と浸水特性の関係性

本検討では、予測降雨データを想定した 5km メッシュを細分化し、多様な降雨の時空間分布を設定し、計画規模相当から超過降雨規模までの降雨における時空間分布と浸水特性の関係性を河川と下水道を一体で解析する内外水同時解析で分析したものである。そして、メッシュ内の降雨分布と浸水被害の関係性を定量的に整理することで、今後の都市部における中小河川や下水道の浸水予測の情報提供や水害リスクの周知への基礎的な知見を示すことを目的とした。

5.1.1 予測降雨データの内外水同時解析への導入に向けての課題

近年、全国各地において既往最大規模の降雨を超過する降雨イベントや過去に事例のない降雨の時空間分布によって豪雨災害が頻発している。豪雨災害の頻発は、地球温暖化に伴う気候変動による影響が示唆されており日本政府は気候変動を考慮した治水計画の見直しを提言している。気候変動の影響を考慮した治水計画や浸水被害予測の検討には、Mizuta et al.ら(2017)の d4PDF の将来予測降雨を用いて幅広く実施されている。

予測降雨データは、数十 km から数 km メッシュ等の空間解像度となっておりメッシュ内の降雨分布は一樣として一般的に提供されている。流域スケールが数百 km² となる大河川の基準値地点における流出量に関する議論では、メッシュ内の降雨の空間分布による影響は僅かであると考えられる。一方で、流域スケールが数 km² の中小河川の流出量、数 ha の下水道集水区への流入量は予測降雨データのメッシュ内の時空間分布の変化によって河川のピーク水位や下水道からの溢水の有無に影響する可能性が考えられる。そのため、メッシュ内の降雨の時空間分布によって浸水被害にどの程度影響するのかを明らかにする必要がある。既往研究では、戸田らは予測降雨データを氾濫解析の境界条件として使用する際に時間的な解像度による浸水域の変化を示している。一方で、メッシュ内の降雨の空間分布の変化がどれほどの浸水被害(浸水深等)として影響するのかを定量的に評価した事例は存在しない。

本研究では、多様な降雨の時空間分布を設定し、計画規模相当から超過降雨規模までの降雨における時空間分布と浸水特性の関係性を河川と下水道を一体で解析する内外水同時解析で分析し予測降雨データの導入に向けて基礎的な検討を実施した。

5.1.2 対象とする空間スケールの整理

本研究で対象とする降雨予測データ、河川の流域、下水道の集水域の空間スケールを整理した。図-1 に対象とする降雨予測データのメッシュサイズ、大河川から小河川までの流域、下水道の集水区を示す。各空間スケールは、降雨予測データは $5\text{km} \times 5\text{km}$ メッシュを想定し、国の管理する大河川は約 $1,000\text{km}^2$ 、都道府県が管理する中小河川は約 20km^2 、市町村の管理する小河川は約 1km^2 、下水道の集水区は数 ha となっている。国の管理する大河川の流域スケールと降雨予測データのメッシュサイズを比較すると小流域からの流出量という観点では、降雨予測データのメッシュ内の降雨分布による影響は僅かであると考えられる。一方で、中小河川、小河川、下水道の流域スケールと比較すると、降雨予測データのメッシュ内の降雨分布によって流出量が異なることが想定される。図 5.1.1 の領域①は、中小河川の上流域となっており降雨予測データのメッシュ内の雨量分布が一様か分布を持つかで上流域からの流出量に影響することが明らかである。また、領域②内の小河川や下水道は降雨予測データのメッシュ内の時空間分布によって降雨量が変化すると流出量が大きく変化する空間スケールとなっている。これらのことからメッシュ内の降雨の空間分布によって河川や下水道の水位が変化することが容易に推測でき、その影響が浸水域(浸水被害)としてどの程度なのか議論する必要があると考えられる。

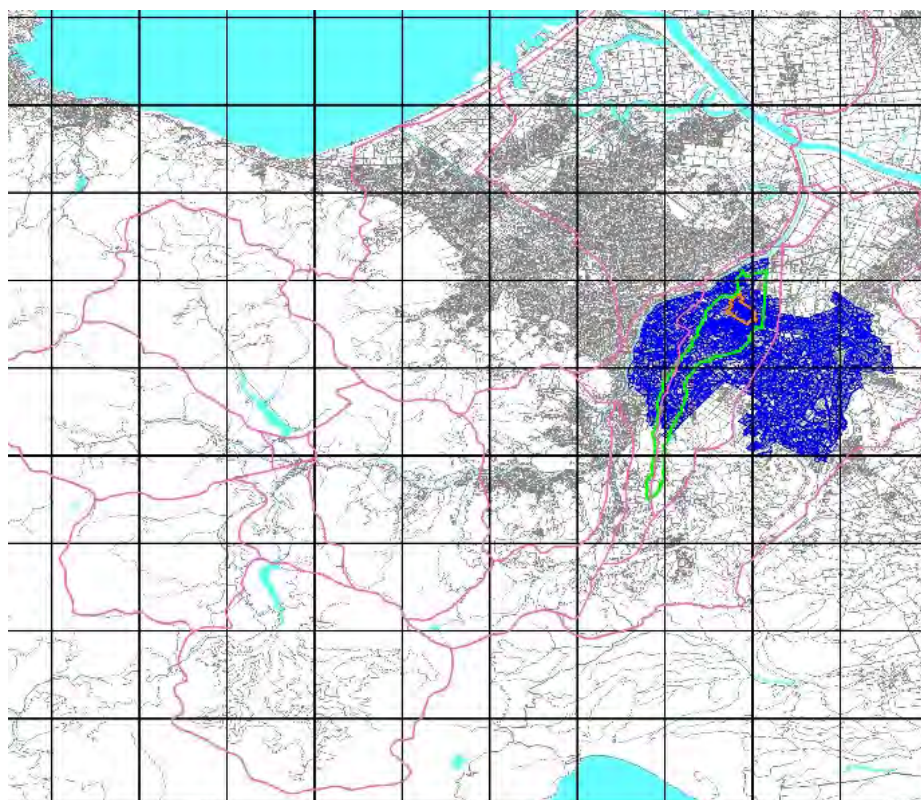


図 5.1.1 対象とする降雨予測データの解析メッシュと河川と
下水道の集水域の空間スケールの比較

5.1.3 予測降雨の時空間分布の設定

前述の降雨予測データのメッシュサイズと各流域スケールの比較を踏まえて降雨予測データのメッシュ内の雨量に空間分布を設定した。空間分布を設定するために、降雨予測データ(5km)を気象庁の高解像度降雨ナウキャストの空間解像度を参考に 1km メッシュと 250m メッシュの2つの解像度に細分化を実施した。250m メッシュに細分化したのは XRain の空間解像度を参考とした。図 5.1.2 に細分化した 5km メッシュ内の空間解像度を示す。細分化を実施することで、中小河川から小河川・下水道の流域スケールでの降雨の空間分布を設定することが可能となる。

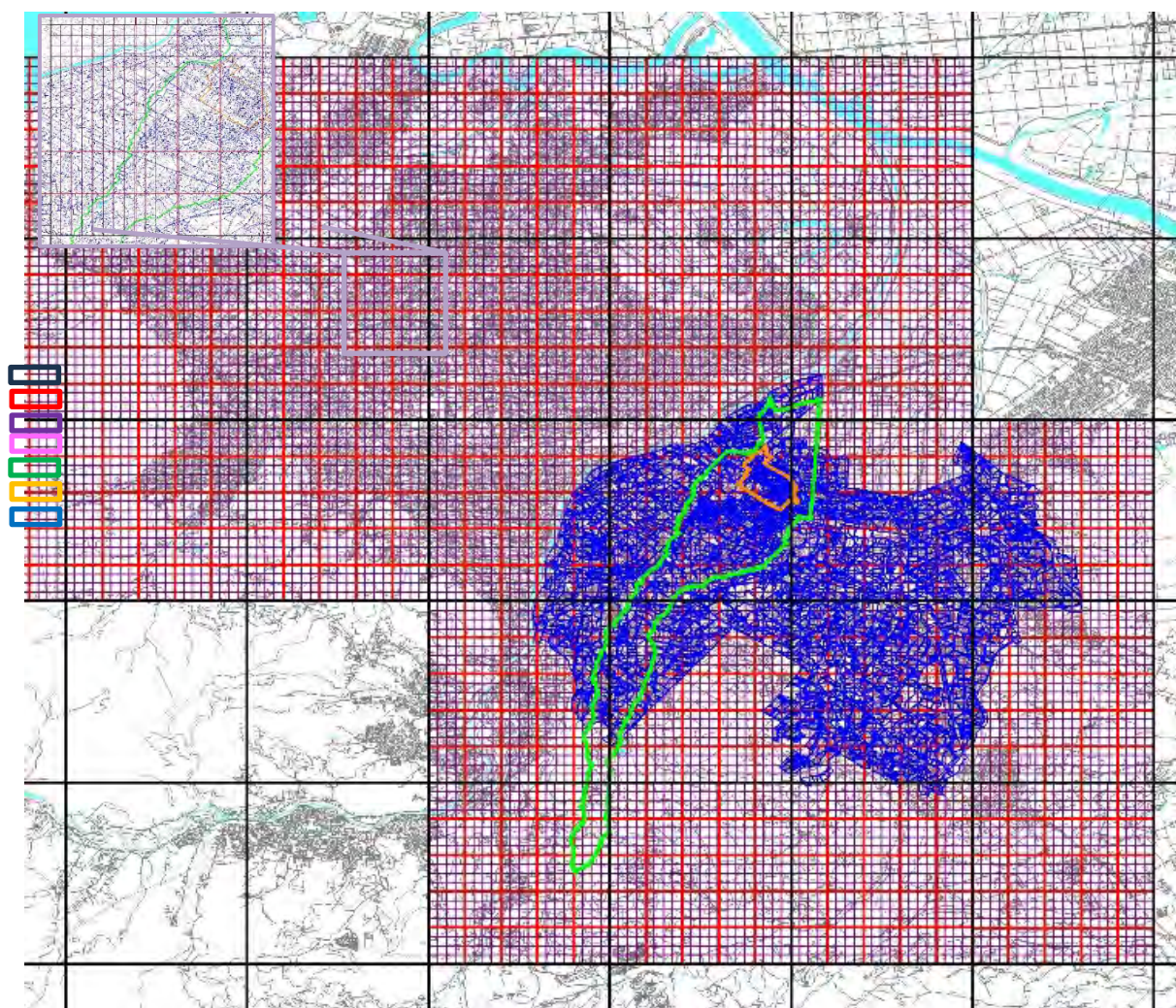


図 5.1.2 降雨予測データメッシュの細分メッシュの設定

5.1.4 5km メッシュ内の降雨の空間分布の設定

5km メッシュ内に降雨の空間分布を作成するために、複数の降雨の空間分布を設定した。一般的に提供される予測降雨のメッシュ内の空間分布は、図 5.1.3 に示すように例えば 70mm/hour の降雨は一様の空間分布となる。実現象では、空間的に降雨量の分布が生じることが想定されるために 4 つの降雨の空間分布を設定した。降雨の空間分布は、5km メッシュ内の総雨量が同じになるように各細分メッシュに 5km メッシュの平均雨量に 2.0 から 0.5 の倍率を乗じることで空間分布を設定した。なお、各細分メッシュの倍率は時間的に変化しないものとした。空間分布の設定は、5km メッシュ内で不規則に降雨が生じる分布設定したランダム分布 (Case.1)、5km メッシュの中央に局所的な豪雨を想定した中央集中分布 (Case.2)、河川や下水道幹線上に降雨が集中することを想定した線状分布 (Case.3)、複列的な降雨の発生を想定した波状分布 (Case.4) とした。設定した 4 つの空間分布を図 5.1.3 に示した 70mm/hour の一様分布に適用することで、図 5.1.4 から図 5.1.7 に示す空間分布を設定した。1km と 250m に細分化した各降雨分布を比較すると空間解像度の違いによって 5km メッシュ内に発生する細分化メッシュ内の最大降雨量の分布が異なることが分かる。細分化した際の各メッシュに設定する降雨量の倍率の条件設定にもよるが、5km メッシュ内の降雨分布を考慮することで総雨量が同値でも最大降雨強度が異なり、浸水被害の発現状況が異なることが想定される。近年、発生するゲリラ豪雨のような現象を踏まえると一様分布と中央集中型降雨による浸水域の変化を把握し、予測降雨を活用した検討が必要であると考えられる。

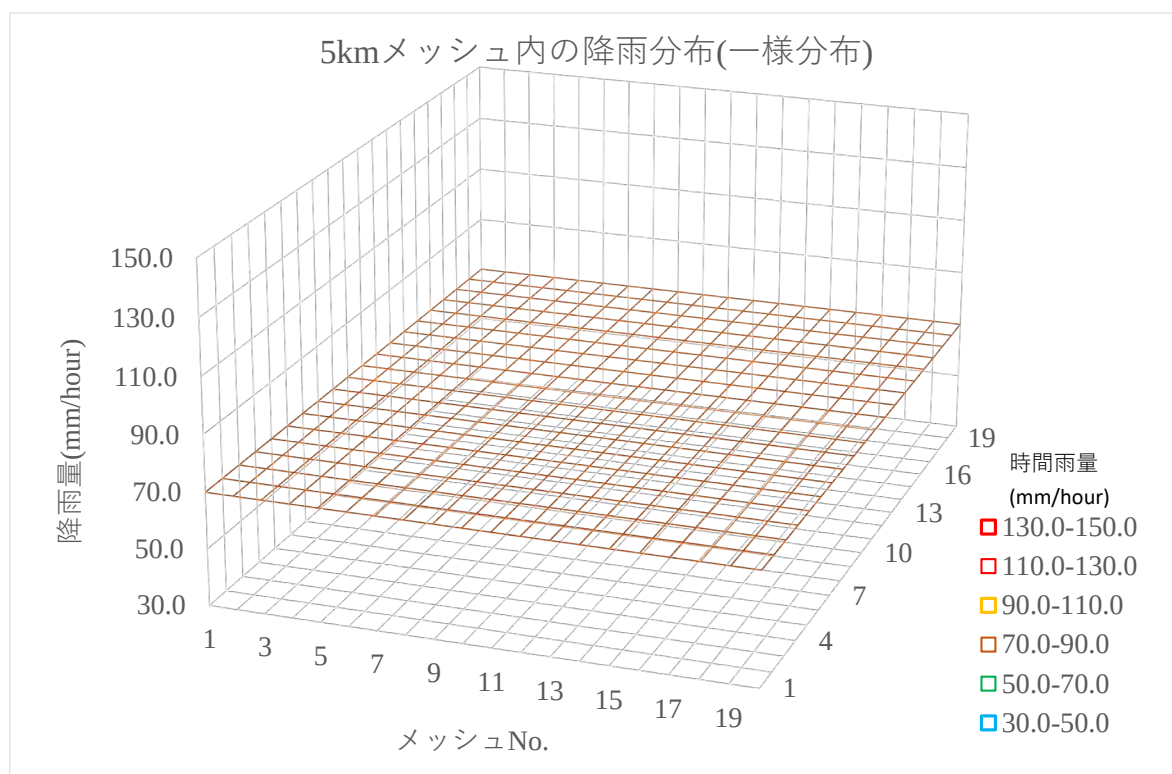


図 5.1.3 5km メッシュ内の降雨の空間分布(一様分布)

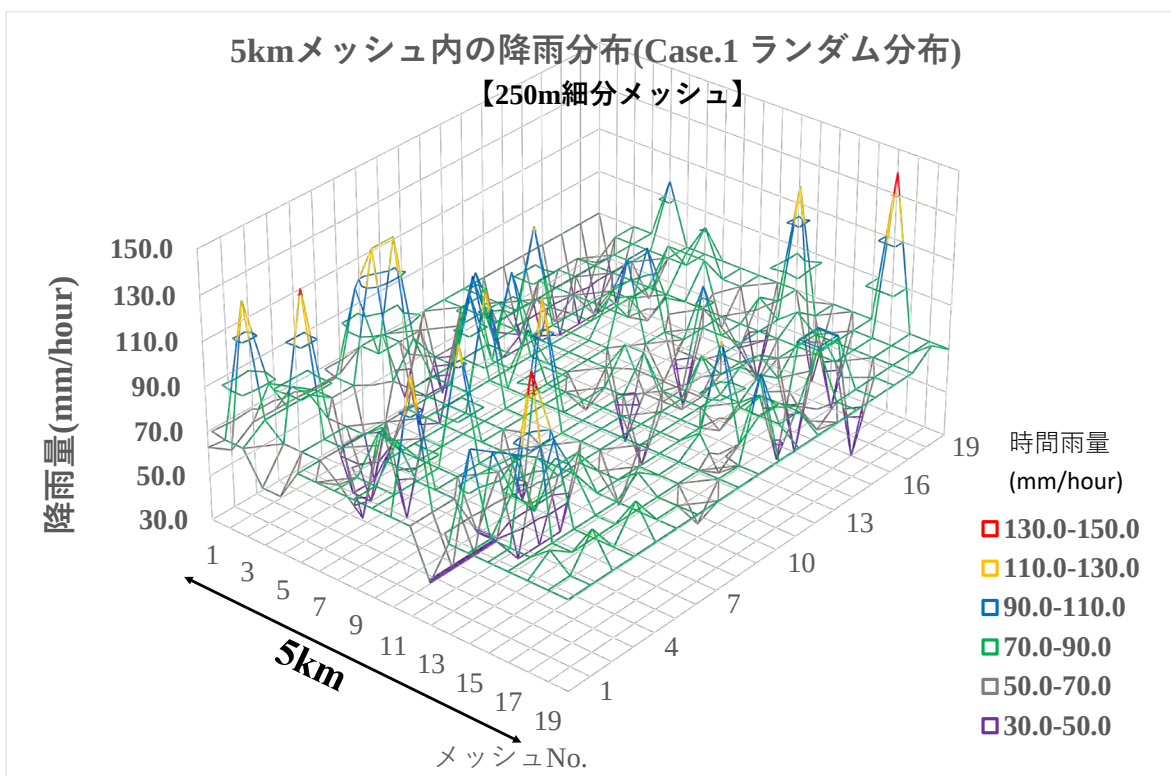
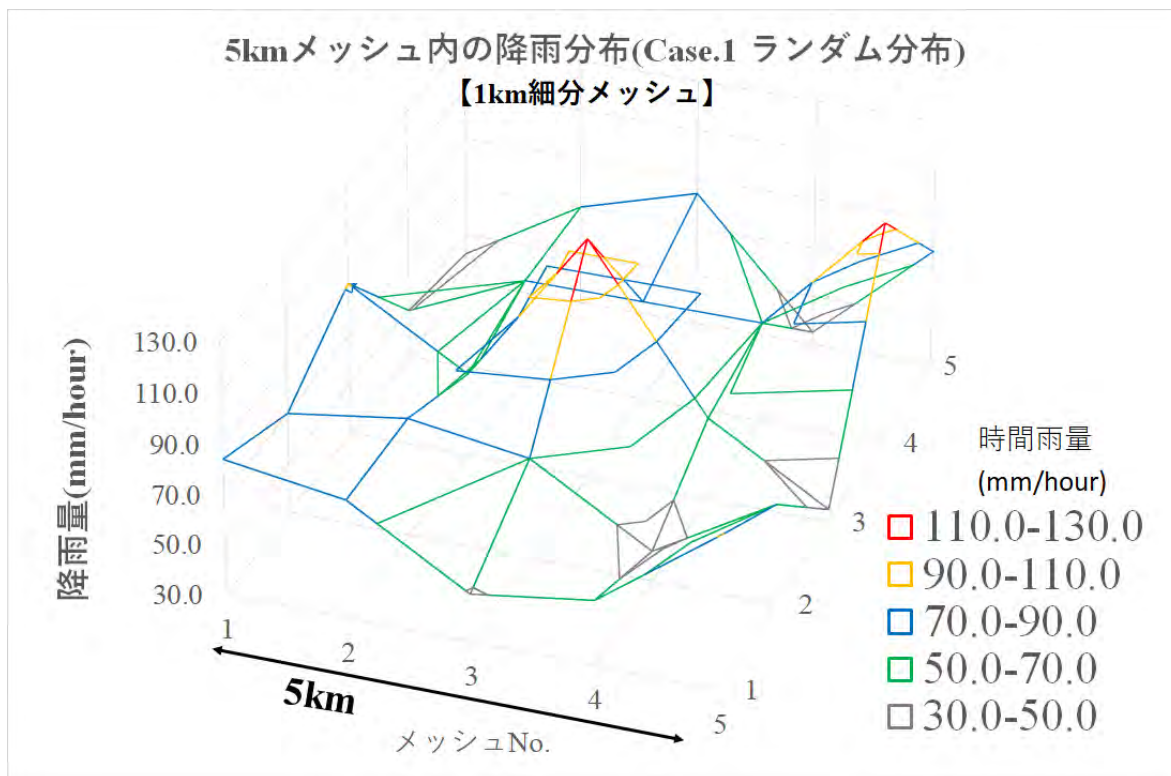


図 5.1.4 降雨の空間分布(Case.1 ランダム分布)

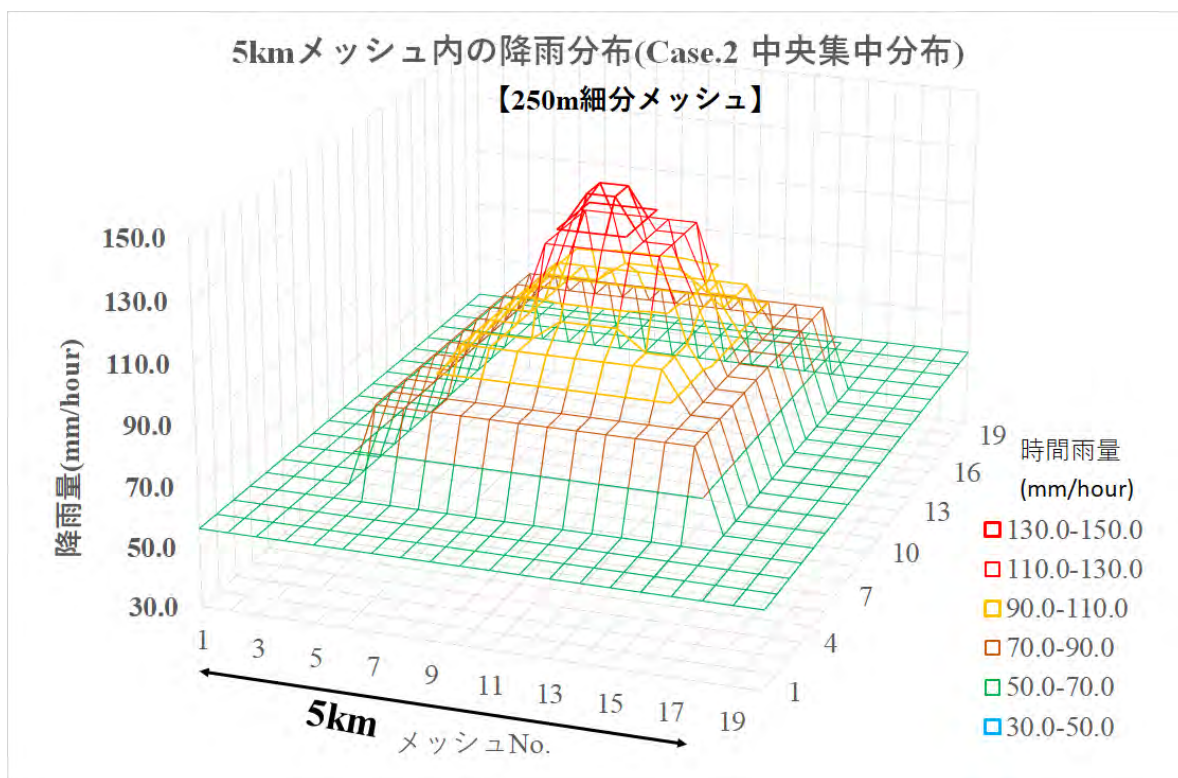
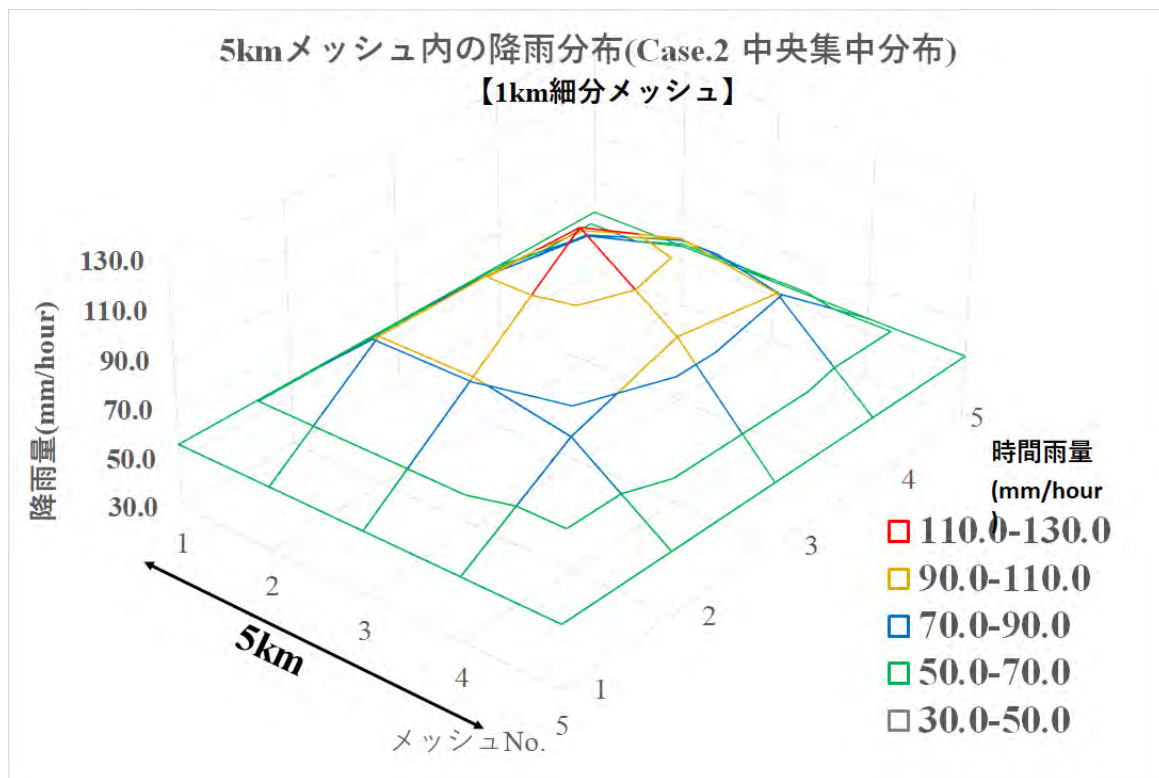


図 5.1.5 降雨の空間分布(Case.2 中央集中分布)

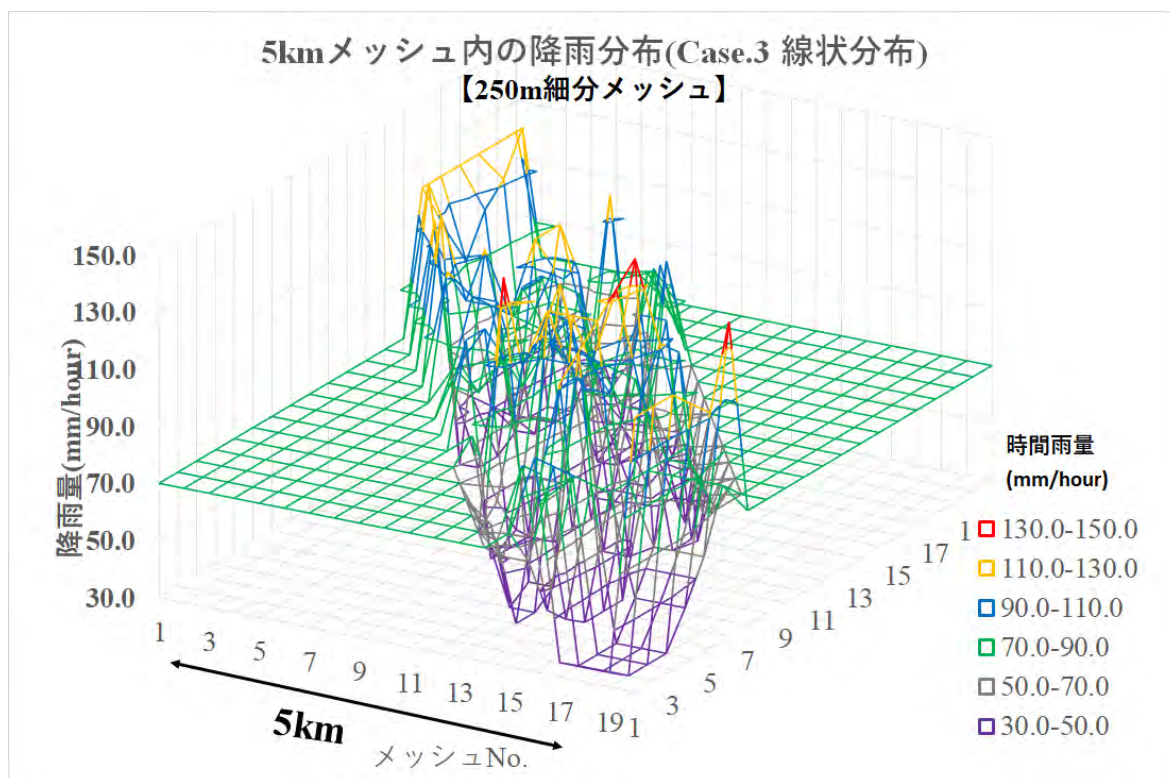
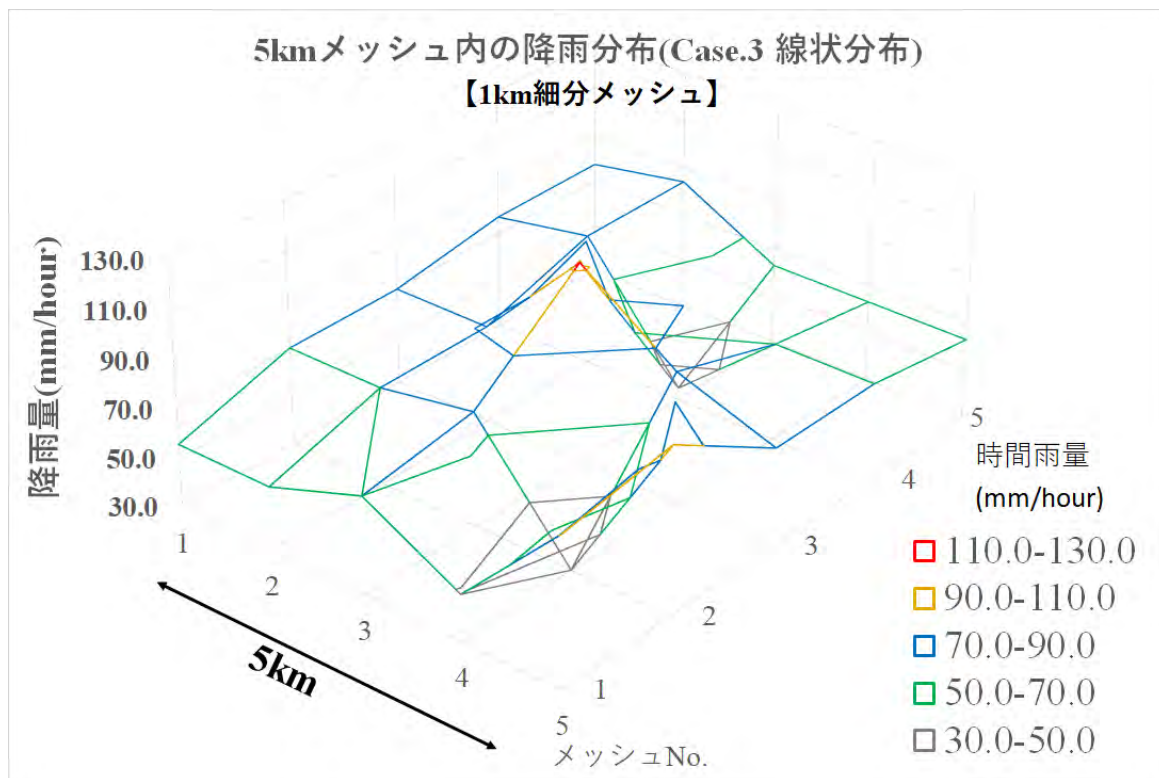


図 5.1.6 降雨の空間分布(Case.3 線状分布)

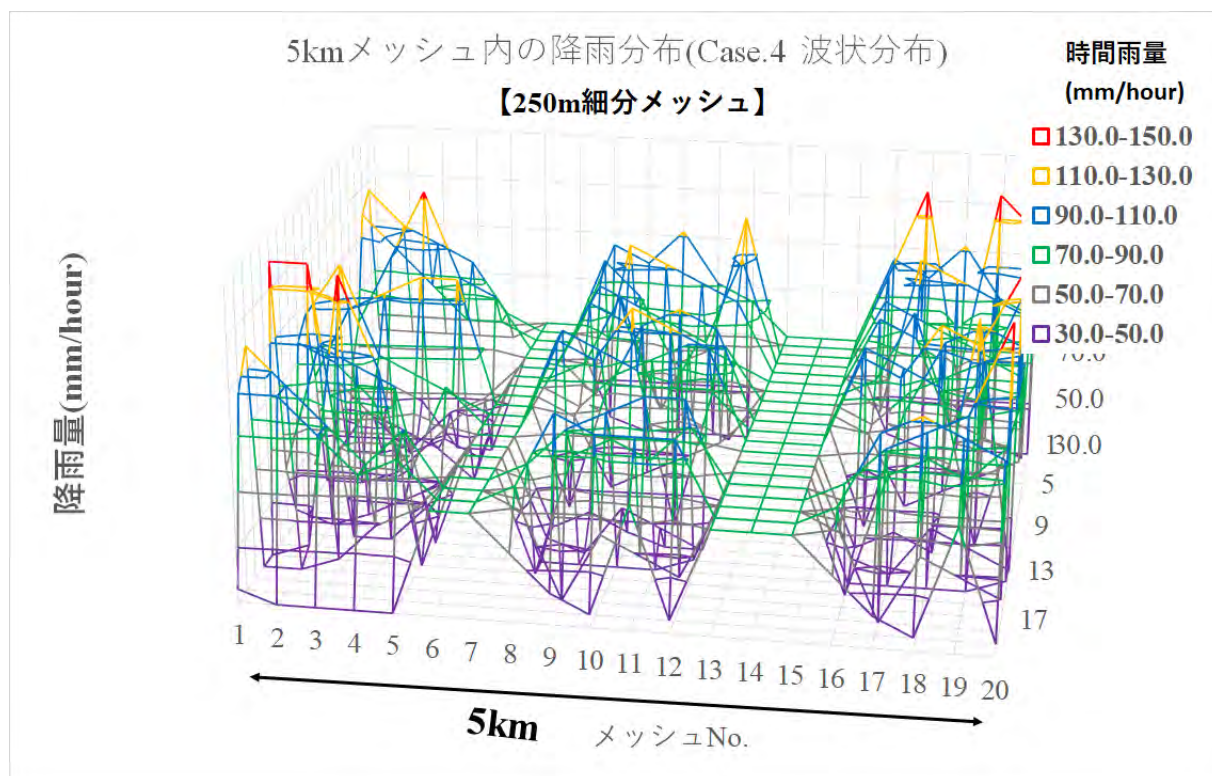
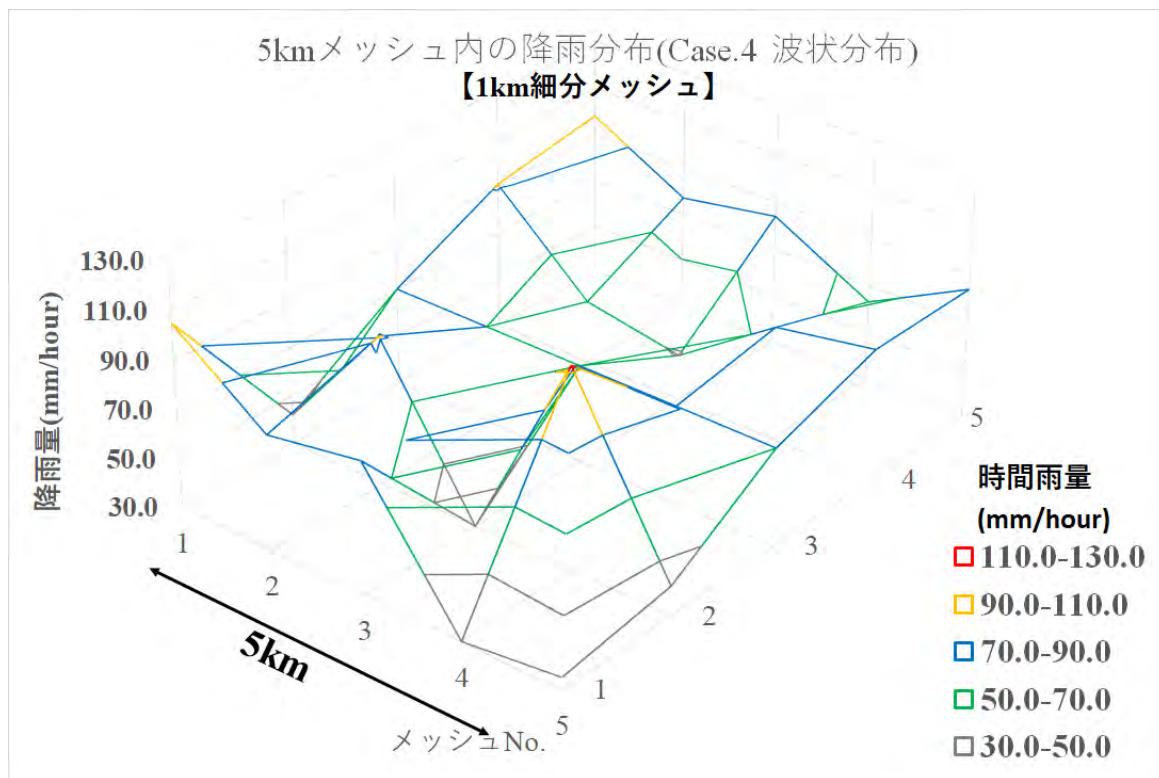


図 5.1.7 降雨の空間分布(Case.4 波状分布)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	63.0	70.0	70.0	56.0	56.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	49.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
2	56.0	126.0	77.0	70.0	70.0	63.0	70.0	70.0	70.0	126.0	70.0	49.0	105.0	70.0	70.0	77.0	70.0	70.0	70.0	70.0
3	63.0	84.0	77.0	133.0	70.0	70.0	42.0	84.0	84.0	70.0	70.0	49.0	98.0	84.0	140.0	70.0	70.0	84.0	70.0	70.0
4	63.0	77.0	77.0	70.0	70.0	70.0	77.0	70.0	70.0	70.0	70.0	49.0	49.0	91.0	70.0	105.0	70.0	70.0	70.0	70.0
5	63.0	70.0	70.0	28.0	28.0	70.0	14.0	70.0	70.0	119.0	70.0	35.0	84.0	84.0	84.0	70.0	70.0	84.0	70.0	70.0
6	63.0	70.0	70.0	28.0	49.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	35.0	70.0	84.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
7	63.0	105.0	126.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	42.0	70.0	35.0	70.0	70.0	70.0	77.0	70.0	70.0	70.0	70.0
8	70.0	70.0	126.0	84.0	70.0	70.0	70.0	119.0	70.0	70.0	126.0	70.0	70.0	49.0	70.0	70.0	70.0	56.0	70.0	70.0
9	70.0	70.0	35.0	70.0	70.0	105.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
10	35.0	70.0	14.0	70.0	105.0	70.0	70.0	91.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	77.0	63.0	70.0	70.0	70.0
11	70.0	35.0	70.0	98.0	70.0	105.0	70.0	70.0	56.0	70.0	70.0	42.0	70.0	70.0	112.0	70.0	105.0	70.0	70.0	70.0
12	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	84.0	84.0	70.0	70.0	63.0	77.0	77.0	70.0	70.0	70.0
13	70.0	70.0	70.0	70.0	112.0	70.0	70.0	70.0	21.0	56.0	56.0	56.0	84.0	70.0	70.0	77.0	77.0	77.0	70.0	70.0
14	70.0	35.0	49.0	70.0	63.0	70.0	70.0	84.0	105.0	70.0	56.0	56.0	56.0	70.0	77.0	77.0	42.0	70.0	63.0	70.0
15	70.0	35.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	105.0	70.0	70.0	98.0	70.0	70.0	77.0	70.0	91.0	91.0	70.0	70.0
16	70.0	35.0	70.0	70.0	56.0	70.0	63.0	77.0	21.0	70.0	70.0	70.0	56.0	70.0	21.0	91.0	91.0	70.0	70.0	70.0
17	70.0	28.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	21.0	70.0	21.0	70.0	70.0	70.0
18	70.0	21.0	63.0	70.0	70.0	56.0	84.0	84.0	84.0	56.0	49.0	77.0	70.0	77.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
19	70.0	14.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	91.0	70.0	70.0	28.0	70.0	126.0	70.0	28.0	70.0	70.0	70.0	70.0	77.0
20	70.0	7.0	70.0	70.0	98.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	21.0	70.0	70.0	70.0	140.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
2	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
3	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
4	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
5	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
6	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
7	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
8	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	98.0	98.0	105.0	105.0	105.0	98.0	98.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
9	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	98.0	126.0	126.0	126.0	126.0	98.0	84.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
10	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	98.0	98.0	126.0	140.0	140.0	126.0	126.0	105.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0
11	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	98.0	126.0	140.0	140.0	126.0	126.0	105.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
12	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	98.0	126.0	126.0	98.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
13	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	98.0	98.0	105.0	105.0	98.0	98.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
14	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
15	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
16	56.0	56.0	56.0	56.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	84.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
17	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
18	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
19	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0
20	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0	56.0

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	77.0	105.0	35.0	35.0	126.0	70.0
2	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	63.0	63.0	98.0	21.0	21.0	126.0
3	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	63.0	91.0	42.0	91.0	14.0	14.0
4	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	63.0	14.0	84.0	35.0	84.0	28.0	28.0
5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	56.0	21.0	21.0	112.0	28.0	77.0	42.0	42.0
6	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	49.0	140.0	35.0	35.0	119.0	21.0	77.0	56.0	56.0
7	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	77.0	56.0	105.0	126.0	126.0	126.0	14.0	77.0	77.0	77.0	77.0
8	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	105.0	14.0	42.0	112.0	105.0	105.0	133.0	98.0	77.0	77.0	63.0	70.0	70.0
9	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	105.0	21.0	35.0	126.0	91.0	91.0	140.0	112.0	77.0	56.0	70.0	70.0	70.0
10	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	84.0	77.0	91.0	7.0	28.0	98.0	28.0	28.0	35.0	105.0	49.0	70.0	70.0	70.0	70.0
11	70.0	70.0	70.0	70.0	112.0	105.0	105.0	77.0	105.0	21.0	91.0	77.0	77.0	7.0	35.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
12	70.0	70.0	70.0	126.0	98.0	98.0	56.0	84.0	98.0	14.0	84.0	105.0	105.0	14.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
13	70.0	70.0	119.0	35.0	112.0	91.0	119.0	126.0	91.0	7.0	77.0	49.0	21.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
14	70.0	126.0	56.0	28.0	77.0	84.0	105.0	105.0	56.0	35.0	63.0	28.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
15	119.0	105.0	49.0	28.0	91.0	77.0	63.0	35.0	49.0	28.0	42.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
16	119.0	91.0	42.0	35.0	91.0	63.0	56.0	14.0	35.0	105.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
17	119.0	105.0	35.0	21.0	84.0	49.0	119.0	21.0	98.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
18	119.0	112.0	14.0	14.0	77.0	42.0	56.0	91.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
19	119.0	126.0	21.0	14.0	56.0	14.0	84.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
20	119.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0

Case4. 波状分布																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	63.0	126.0	119.0	77.0	63.0	14.0	63.0	35.0	21.0	77.0	105.0	98.0	35.0	56.0	140.0	10.0	14.0	119.0	105.0	35.0
2	63.0	112.0	105.0	105.0	56.0	7.0	49.0	56.0	14.0	105.0	126.0	9.0	21.0	105.0	140.0	35.0	7.0	105.0	105.0	28.0
3	63.0	105.0	91.0	133.0	49.0	35.0	35.0	35.0	112.0	91.0	77.0	70.0	35.0	98.0	35.0	140.0	35.0	91.0	91.0	21.0
4	63.0	98.0	77.0	98.0	28.0	49.0	42.0	42.0	49.0	119.0	84.0	49.0	42.0	91.0	35.0	105.0	49.0	77.0	77.0	14.0
5	63.0	77.0	77.0	91.0	21.0	56.0	35.0	28.0	63.0	119.0	77.0	84.0	49.0	14.0	49.0	21.0	56.0	91.0	84.0	7.0
6	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
7	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
8	105.0	35.0	105.0	98.0	56.0	98.0	77.0	63.0	63.0	21.0	105.0	105.0	35.0	35.0	28.0	71.0	77.0	63.0	77.0	56.0
9	98.0	28.0	91.0	91.0	119.0	91.0	105.0	77.0	35.0	77.0	98.0	98.0	42.0	21.0	21.0	77.0	91.0	21.0	105.0	42.0
10	112.0	21.0	63.0	84.0	112.0	65.0	63.0	84.0	42.0	105.0	91.0	119.0	35.0	49.0	14.0	84.0	98.0	56.0	98.0	91.0
11	91.0	14.0	70.0	70.0	105.0	84.0	56.0	91.0	42.0	112.0	28.0	112.0	71.0	7.0	42.0	28.0	77.0	105.0	49.0	98.0
12	84.0	7.0	126.0	112.0	98.0	77.0	49.0	91.0	56.0	105.0	64.0	105.0	21.0	35.0	35.0	91.0	105.0	42.0	98.0	35.0
13	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
14	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
15	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
16	105.0	35.0	105.0	98.0	56.0	98.0	77.0	63.0	63.0	21.0	105.0	105.0	35.0	35.0	28.0	21.0	77.0	63.0	77.0	56.0
17	98.0	28.0	140.0	91.0	119.0	91.0	105.0	77.0	35.0	77.0	98.0	98.0	42.0	21.0	21.0	77.0	91.0	21.0	105.0	42.0
18	112.0	21.0	63.0	84.0	112.0	56.0	63.0	84.0	42.0	105.0	91.0	119.0	35.0	49.0	14.0	84.0	98.0	56.0	112.0	35.0
19	91.0	14.0	140.0	77.0	105.0	84.0	56.0	91.0	42.0	112.0	28.0	112.0	71.0	7.0	42.0	28.0	77.0	105.0	49.0	98.0
20	84.0	7.0	126.0	112.0	98.0	77.0	49.0	91.0	56.0	105.0	64.0	140.0	21.0	35.0	35.0	91.0	140.0	42.0	98.0	35.0

5.1.5 対象流域の概要

大河川から中小河川に加えて下水道の浸水特性を予測するために、内外水同時解析モデルを構築した。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河川流出は貯留関数法と合成合理式と③下水道雨水流出は修正 RRL 法から算定した。その流出量を河道上流端及び下水道のマンホールに与え、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。河道追跡モデルは、一級河川の直轄管理区間から、指定区間、準用河川も一次元不定流解析モデル化した。モデル化区域は、図 5.1.9 に示しており対象区域の 600mm 以上の管路はすべてモデル化を実施し、著者らの既往研究において内水氾濫を調査した地点や浸水実績が生じた地域においては 600mm 以下の管路もモデル化を実施した。さらに、⑤氾濫モデルにより地表面の氾濫の拡がりを直交座標系の平面二次元氾濫解析で実施した。地表面のメッシュは、窪地等への浸水も表現できるように 10m メッシュで構築した。

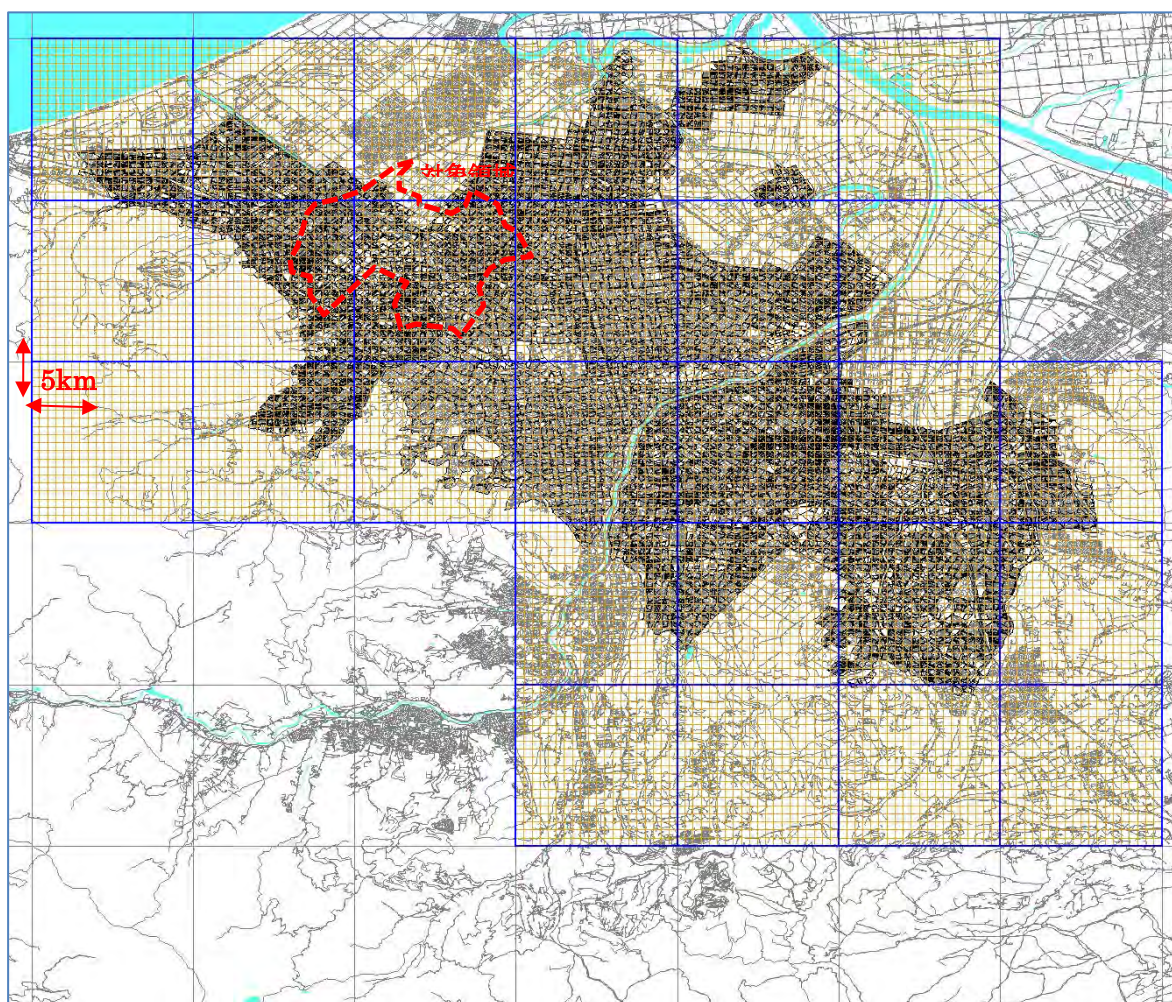


図 5.1.9 対象領域とモデル化した下水道集水域

5.1.6 降雨の時空間解像と浸水特性の関係性

設定した各降雨の空間分布を境界条件として、内外水同時解析モデルを用いて浸水域を算出し、浸水特性の分析を実施した。

(1) 降雨の時間分布の設定

降雨波形は、図 5.1.10 に示すように対象地区で内水氾濫が発生した実績降雨波形を用いた。選定した降雨波形を対象に計画規模相当(35mm/hour)から超過洪水規模相当(150mm/hour)までを 5mm/hour 間隔で引き伸ばしを実施し、その後、浸水面積の変化点の降雨規模を対象に降雨の時空間分布を反映した。更に、降雨の時間解像度による浸水特性の変化を比較するために一様分布で時間雨量として降雨を与える(10 分雨量を時間平均した波形)条件でも解析を実施した。

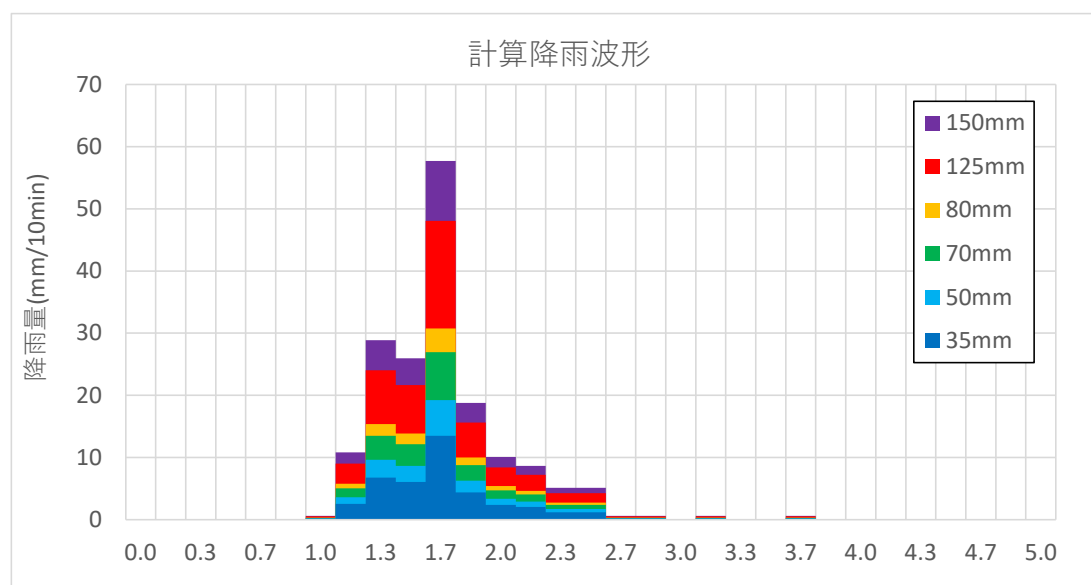


図 5.1.10 計算対象降雨波形

(2) 降雨の時空間分布と浸水面積の関係性

設定した降雨分布を用いて浸水解析を実施し、図 5.1.11 に示すように各降雨規模における浸水面積を集計した。浸水面積は、80mm/hour までは降雨量に対して線形的に増加しており、80mm/hour 以上の降雨では浸水面積の増加率は鈍化している。これは、対象地域において浸水が発生し易い弱部が 80mm/hour 程度となっていることが要因であると推測できる。降雨の空間分布の解像度に注目とすると、250m と 1km に細分化した場合での浸水面積で取り得る幅は、±10%と空間分布の影響は僅かとなっている。図 5.1.11 に降雨の空間分布による取り得る幅を整理すると、一様に降雨を与えた条件に対して浸水面積が降雨分布を考慮することで 0.8 倍から 1.2 倍程度の幅を持つことが明らかとなった。

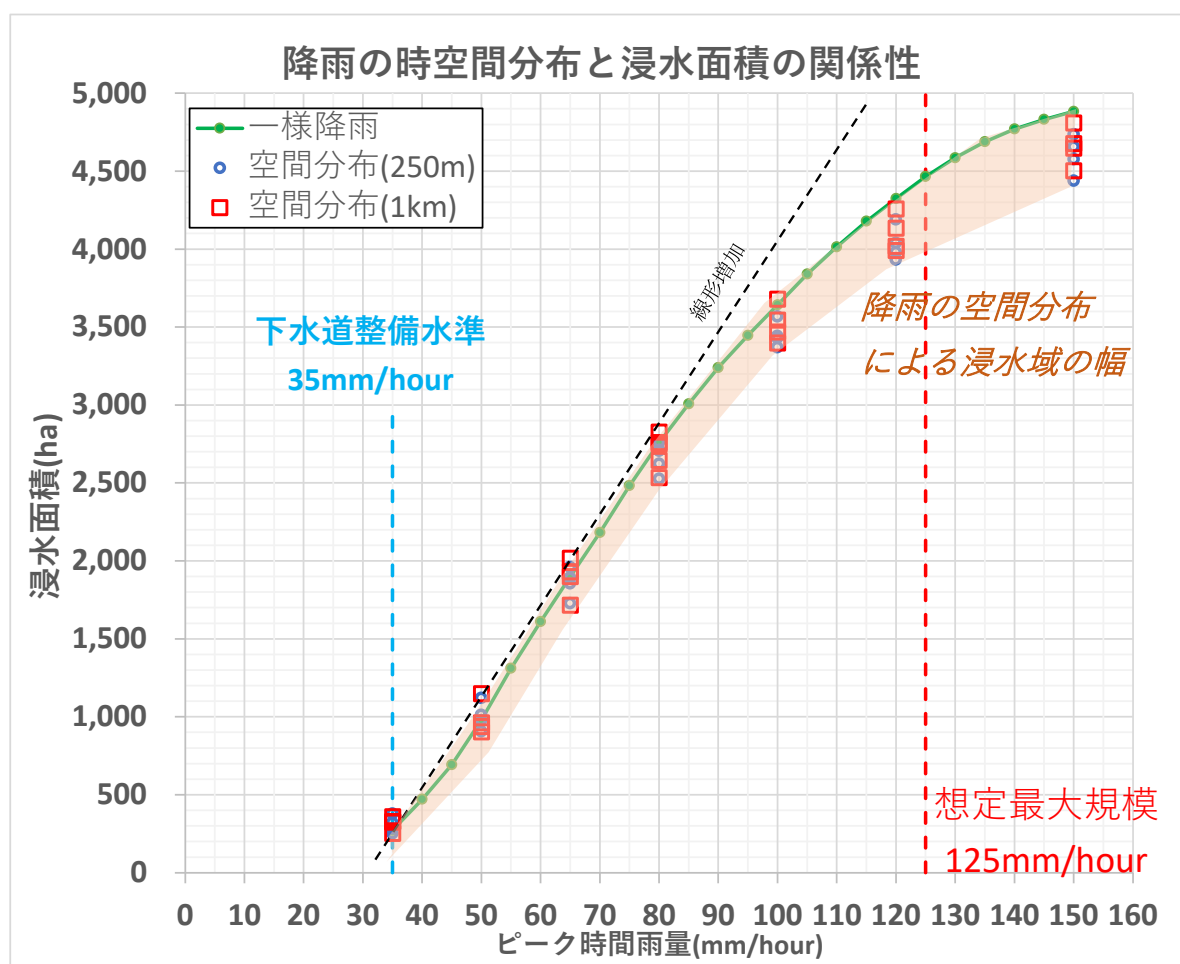


図 5.1.11 降雨の時空間分布と浸水面積の関係性

(3) 降雨の時空解像度と浸水面積の関係性

一様に与えるケースを基準とし、80mm/hour の浸水面積を図 5.1.12 に示すように整理した。なお、各降雨の空間分布は、10 分雨量に対して反映した。メッシュ内に一様に降雨を与えるケースは、浸水が発生する可能性を示す水害リスクの周知の観点では安全側の境界条件として考えられる。一方で、床上浸水の面積では、図 5.1.13 に示すようにメッシュ内の降雨分布を考慮することで増加している。これは、中央集中分布や線状分布の様に局所的に強い降雨が発生することで床上浸水が増加している。このことから、メッシュ内に一様に降雨を与えることはメッシュ内の相対的な弱部(浸水し易い地点)を示す条件であり、5km メッシュ内に時空間分布を与えることは、実現象で起こり得る浸水の幅を考慮した条件であると解釈できる。

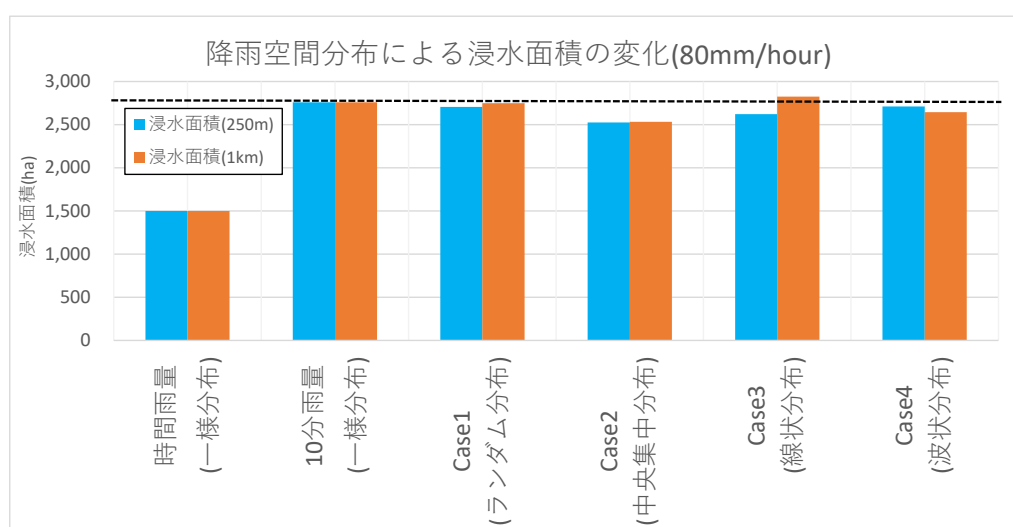


図 5.1.12 80mm/hour を対象とした浸水面積の集計結果

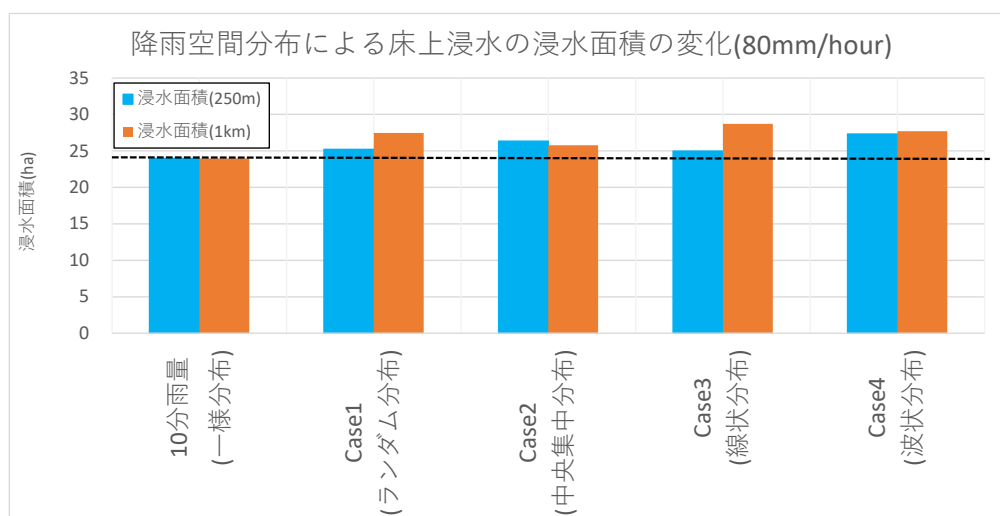


図 5.1.13 80mm/hour を対象とした床上浸水面積の集計結果

降雨規模と降雨の空間分布の関係に注目すると降雨規模が大きくなるにつれて、一様に降雨を与えるケースが最も浸水面積が多くなる結果となった。一様に強い雨を与えるために各メッシュで浸水が発生して浸水面積が大きくなっているものであり、空間分布を考慮すると弱い雨となるメッシュが発生し浸水しない地区が生じることを示している。降雨波形の時間解像度による浸水被害の変化量は、80mm/hour であれば図 5.1.12 に示すように 1 時間雨量に比べて 10 分雨量では浸水面積が約 2 倍程度に増加しており、10 分雨量の最大強度や時間的集中度が影響する。下水道排水先の中小河川の水位と降雨の時間解像度の関係性は、著者が既往研究において実績洪水における河川水位と浸水実績の再現性において 10 分雨量の重要性を示しているため詳細は既往研究を参照して欲しい。そのため、内水氾濫や小河川の氾濫という観点では、降雨の空間解像度よりも時間解像度による影響が大きいことが明らかとなった。

(4) 水害リスクの周知の観点からの影響の評価

図 5.1.14 に各降雨分布での 80mm/hour での最大浸水深図を示している。本検討では、多様な降雨分布を設定し河川から下水道をモデル化した詳細な氾濫解析を用いて計算を実施した。浸水面積として、各ケースの浸水面積を集計すると 0.8 倍から 1.2 倍の幅を持つことが示されるが、浸水ハザードマップ等で住民が認知する空間スケールとしての浸水深図としての差は殆ど見られない。予測降雨データを活用した解析や研究は、過去の経験のない降雨に対する浸水被害に備えるものであり、住民目線や流域スケールでの浸水被害の把握では、予測降雨のメッシュ内の空間分布は一樣で検討しても良いと考えられる。

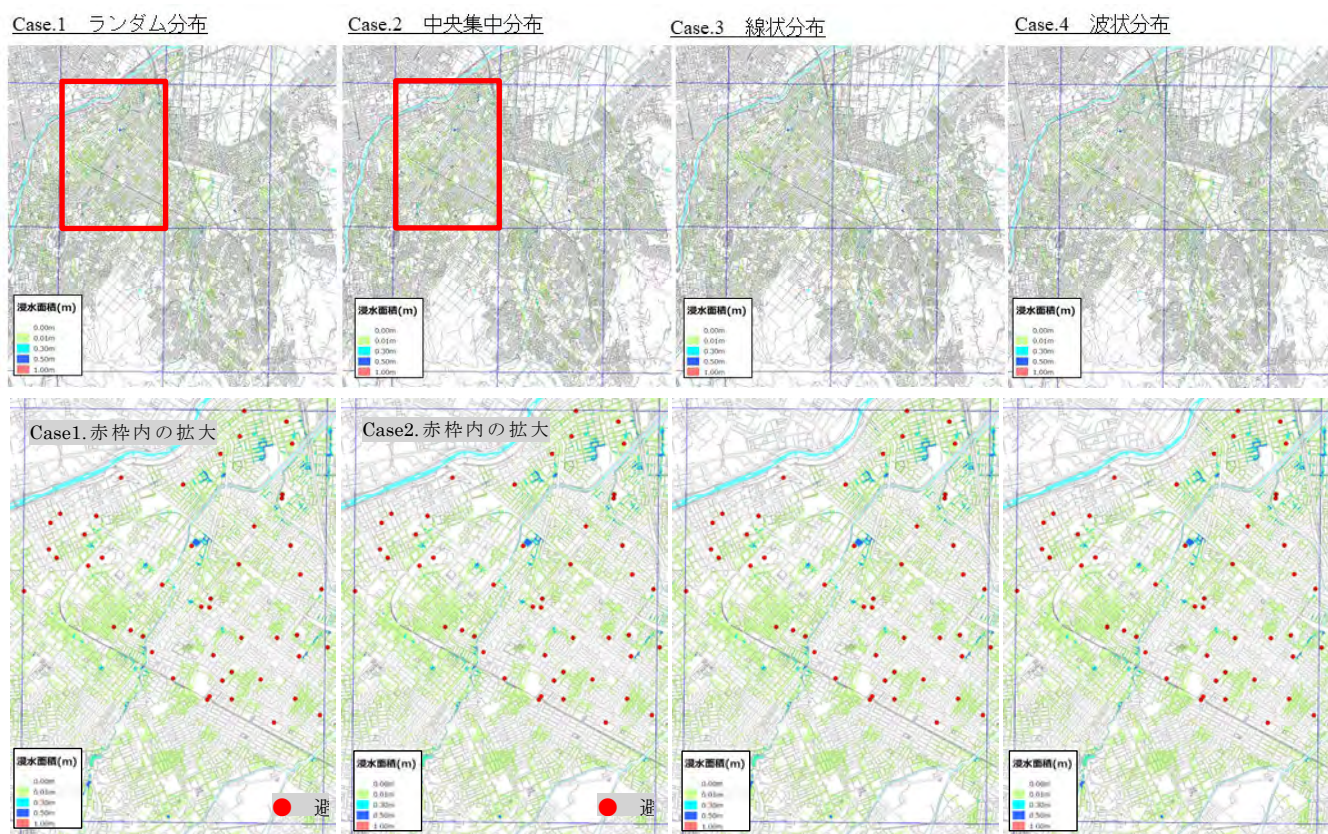


図 5.1.14 80mm/hour での最大浸水深図の比較

5.1.7 降雨の時空間解像と浸水特性の関係性のまとめ

本研究は、気候変動予測降雨データを活用した治水計画論や水害リスクの周知を推進することを目的としている。本研究の成果で、予測降雨データの 5km メッシュ内の降雨量の空間分布によって浸水面積は 0.8 倍から 1.2 倍程度の幅となった。これは、予測降雨データ等の治水計画における対象とする降雨イベントの不確実性に対して、5km メッシュ内という地先単位での不確実性を示したものである。また、水害リスクの周知に活用される超過洪水等の規模では、浸水域(浸水発生の有無)という観点では、一様に降雨を与えることが安全側の条件設定であると考えられる。

今後、本論文では短時間降雨を対象に検討を実施したが、予測降雨データから抽出した降雨波形に時空間分布を反映し、浸水被害特性にどの程度影響を与えるかを示す必要があると考えている。また、他の流域でも計画規模から超過洪水までの浸水深や浸水被害(避難困難や床上浸水等)への降雨の時空間分布による影響を分析し、今後の研究における基礎的な知見を示していくことを実施してきたいと考えている。

5.2 予測降雨データを活用した内外水同時解析による水害リスクの算出手法の提案

本研究で開発した内外水同時解析モデルと降雨予測データ(d4PDF)を活用して、将来起こり得る降雨シナリオに対する水害リスクの算出を実施した。

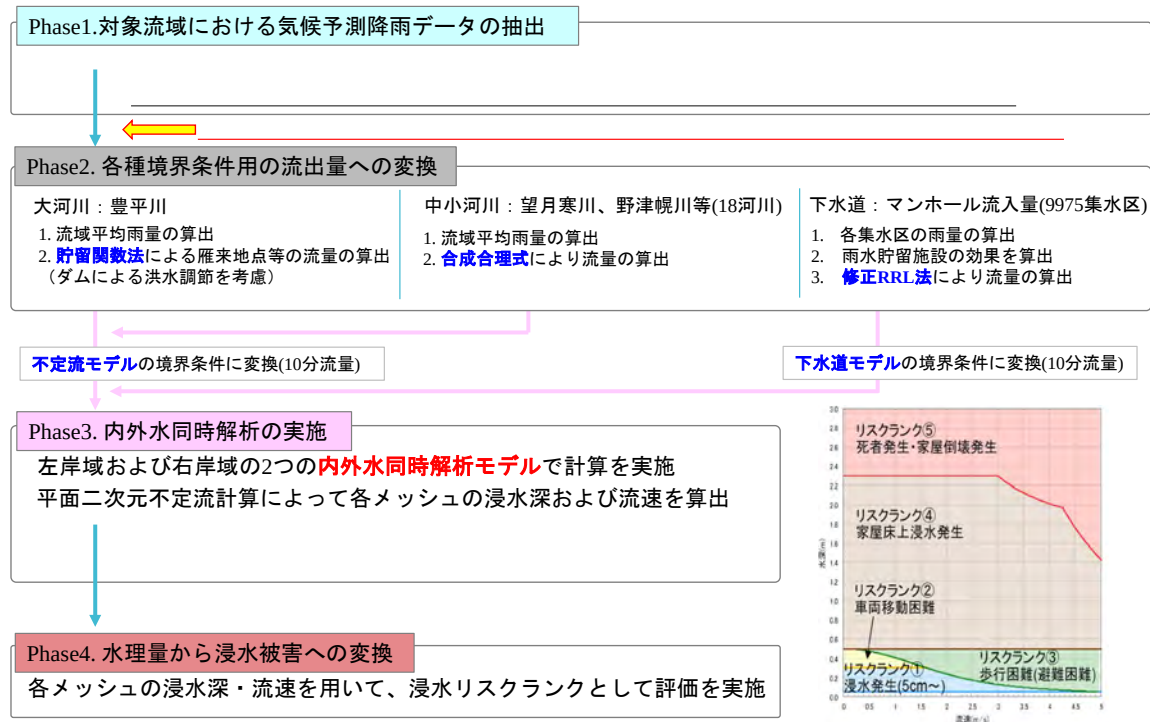


図 5.2.1 予測降雨データを活用した内外水同時解析による水害リスクの算出のフロー図

5.2.1 降雨予測データの概要

本検討では、d4PDF 降雨データ(過去実験 3,000 年+将来実験 5,400 年)を用いる。雁来地点上流域の雨量は、過去実験 5km メッシュダウンスケール雨量から年最大雨量となる 3 日間(72 時間)の雨量を抽出した。流域平均雨量は、雁来地点上流域内の 5km メッシュデータの算術平均で算出した。

項目	内容
実験メンバー数	過去実験：50メンバー 将来実験：90メンバー
実験期間	過去実験：1951年～2010年(60年分)
ダウンスケール期間	石狩大橋地点で年最大3日雨量となる期間を含む15日間

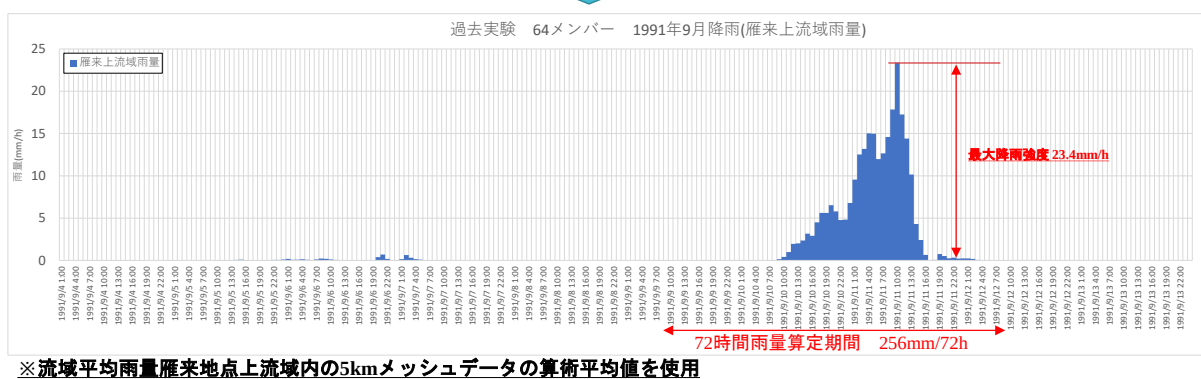


図 5.2.2 対象外力の概要

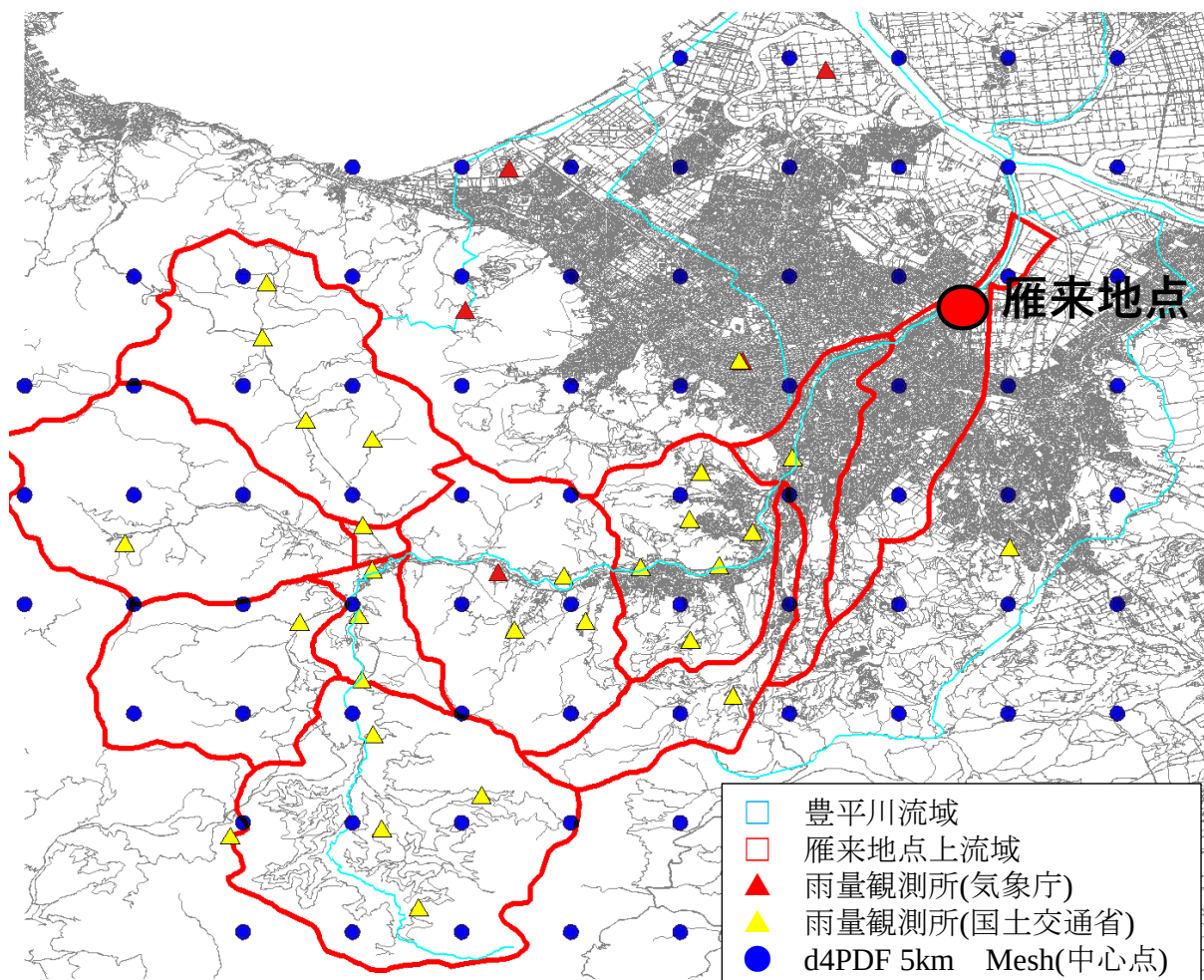


図 5.2.3 対象流域と降雨予測データの空間解像度

5.2.2 対象降雨の抽出

札幌市の各区の雨量観測所の実績雨量と予測降雨データから抽出した雨量の比較を実施した。札幌市内に位置する 10 箇所の土木センターで観測される実績雨量を整理し、予測降雨データと比較した。図 5.2.5 に各雨量観測所の位置を示しており、雨量観測所の位置するメッシュの予測降雨データを抽出した。図 5.2.4 に抽出した実績の観測雨量と過去実験における最大時間雨量と 99%タイル値の比較結果を示す。予測降雨データは、過去実験の年最大降雨イベントの 3,000 ケースを対象とした。各地点の最大値に注目すると、最大値は予測降雨データが最も大きい値を示している。実績の観測最大値と過去実験の 99%タイル値は概ね同程度となっている。

札幌市内に位置する気象庁の札幌観測所での最大時間雨量は、約 50mm/hour となっている。本検討では、経験のない現象対して生じる浸水被害を予測降雨と数値解析で明らかにすることを目的とし、降雨イベント名:HPB_m003_2010 の東区土木センターで最大雨量となったイベントを対象に検討を実施した。なお、札幌市の東区や北区等(豊平川左岸域)において、70mm/hour を超過する降雨の経験はない。

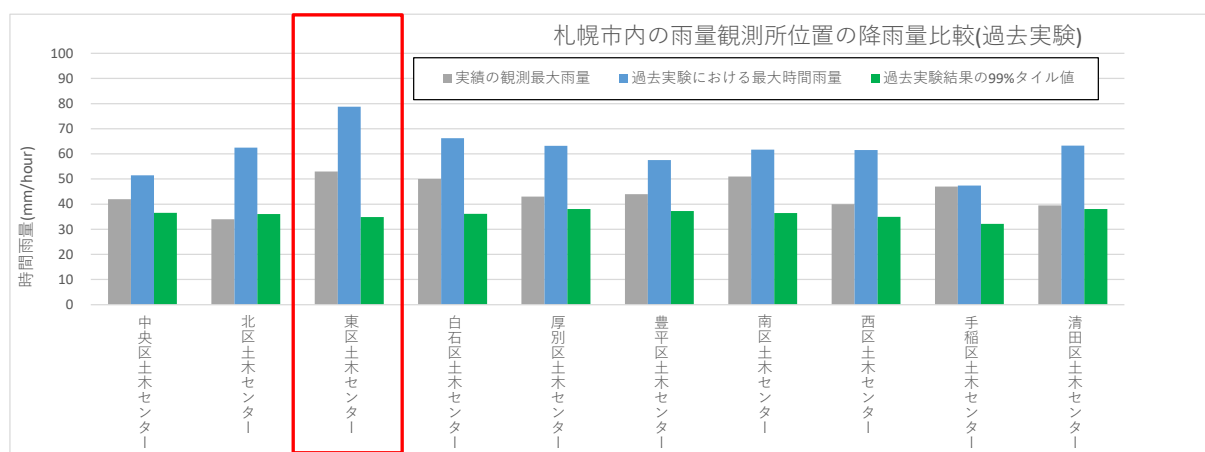


図 5.2.4 札幌市内の雨量観測所位置の降雨量の比較（過去実験）

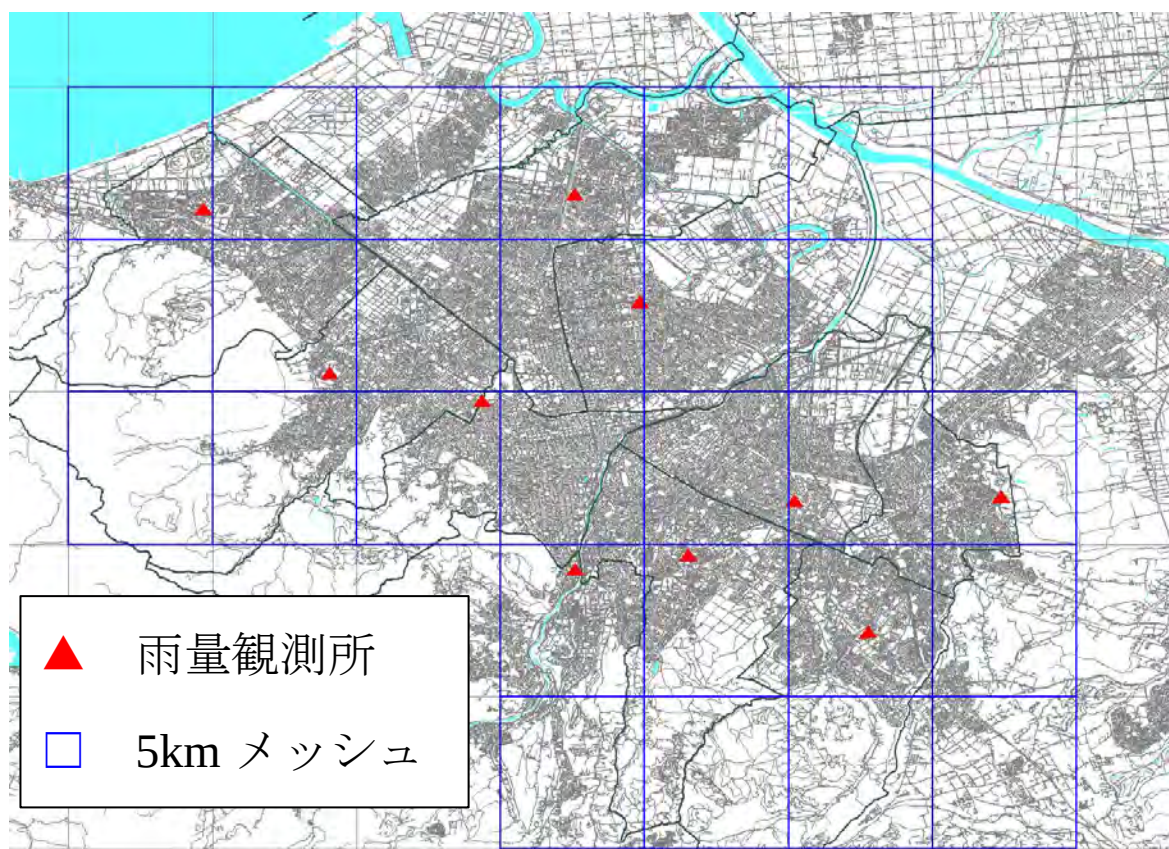


図 5.2.5 札幌市土木センター位置図

5.2.3 対象降雨「HPB_m003_2010」の降雨による浸水被害の想定

抽出した「HPB_m003_2010」の降雨イベントは、時間最大雨量が 80mm/hour となっている。実現象において、札幌市の東区や北区等(豊平川左岸域)において、70mm/hour を超過する降雨の経験はない。図 5.2.6 に本研究で提案した複合確率の生起確率分布図での「HPB_m003_2010」の位置を確認した。総雨量（3 日雨量）では 10 分の 1 確率となる 150mm となり、豊平川の洪水到達時間内雨量では、50 分の 1 確率となる。

図 5.2.7 に札幌圏域における浸水被害特性図に「HPB_m003_2010」の位置を示した。浸水被害特性図から対象降雨では、豊平川から越水は生じないが床上浸水の発生、支川の越水、地下鉄への流入の発生が想定される。この浸水被害特性図を作成することで、氾濫解析を実施せずとも対象降雨によって起こり得る被害を推測できる。

「HPB_m003_2010」は、豊平川の氾濫という大規模な氾濫は生じないが札幌市内 80mm/hour の降雨が発生した際の被害を予測するという点では水害リスクの予測の観点から着目すべき事象であると考え対象外力とした。

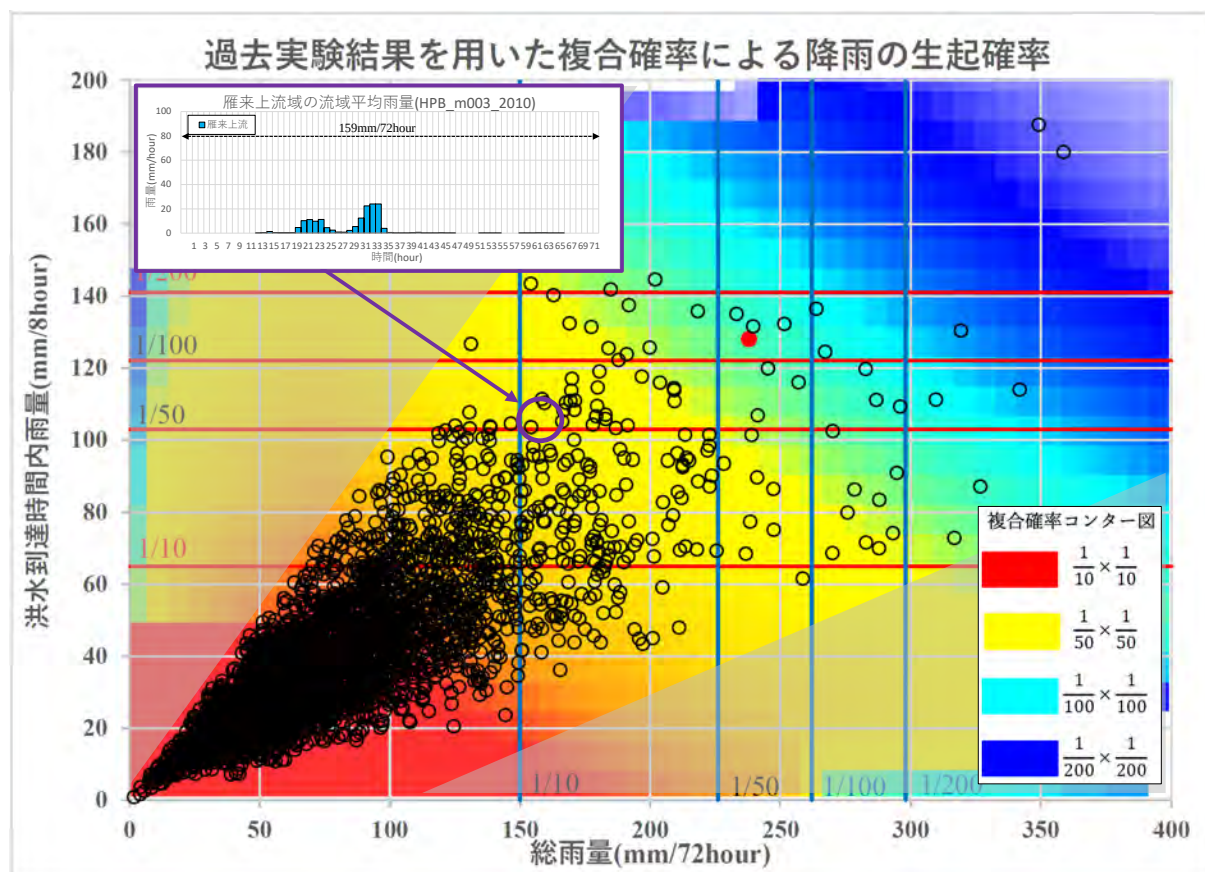


図 5.2.6 複合確率での「HPB_m003_2010」の位置

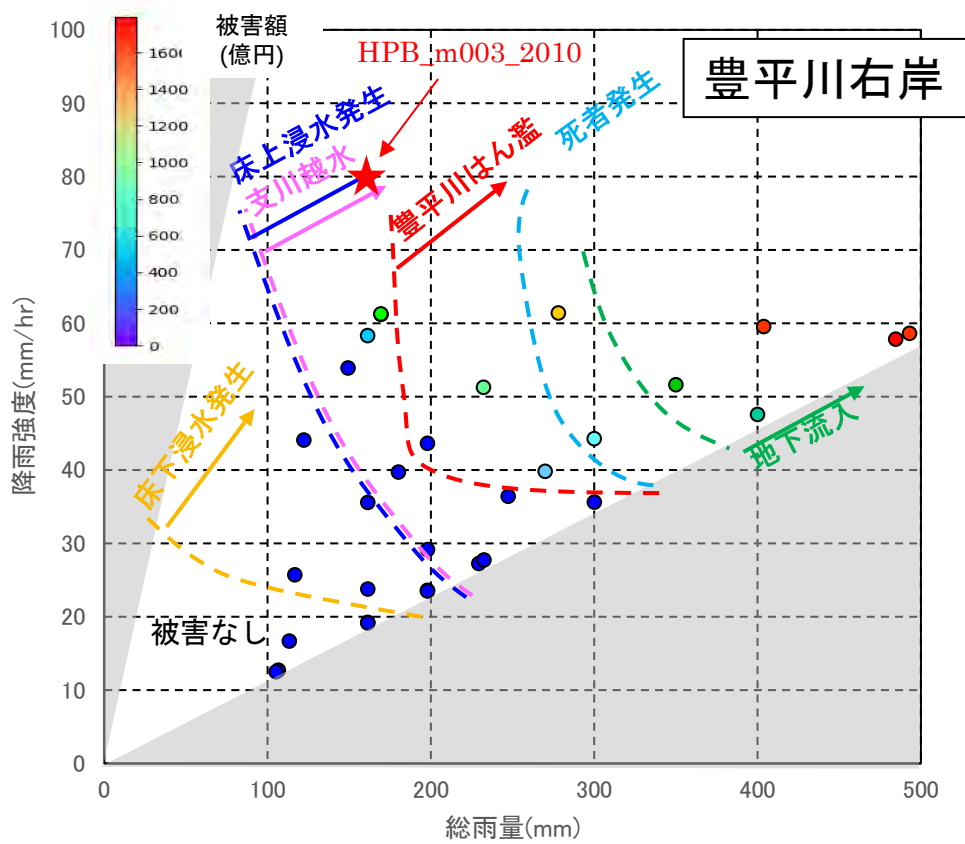
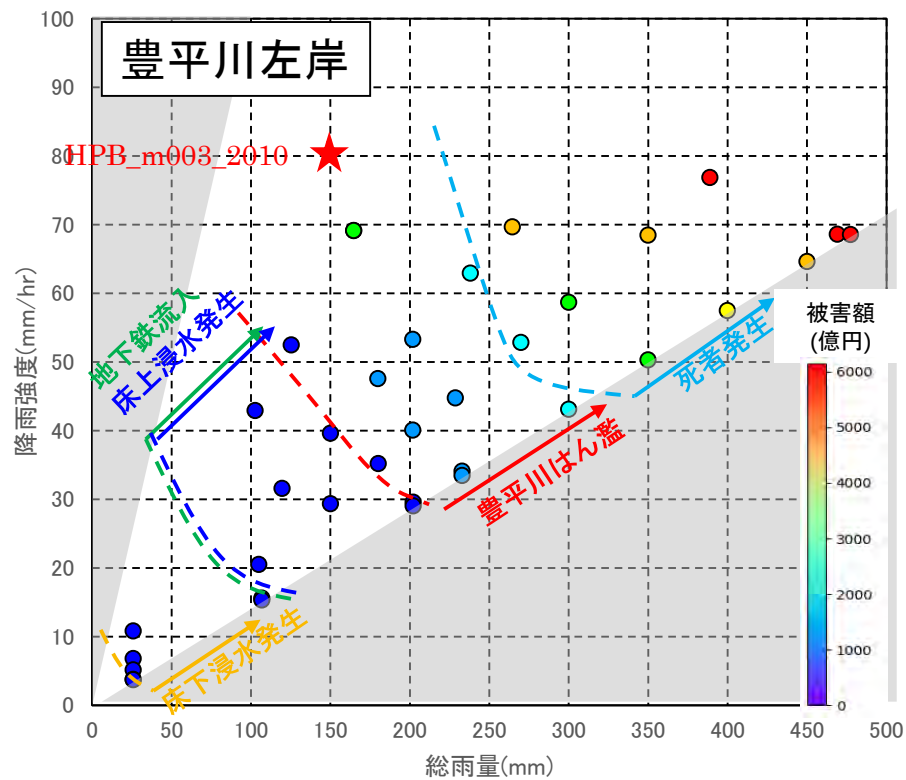


図 5.2.7 札幌圏域における浸水被害特性図での「HPB_m003_2010」の位置

5.2.4 対象降雨「HPB_m003_2010」の降雨の空間分布

過去実験において、時間雨量 80mm が算出された「HPB_m003_2010」の降雨データを用いて内外水同時解析モデルで浸水状況をシミュレーションする。境界条件となる各メッシュの雨量を抽出し、空間分布を確認した。図 5.2.8 に HPB_m003_2010 の空間分布を示す。対象降雨は、豊平川の左岸側に位置する東区や北区では、50mm/hour から 80mm/hour の短時間豪雨が生じる。また、豊平川右岸側の白石区や豊平区では、35mm/hour から 45mm/hour の降雨が生じている。札幌市の下水道の整備目標は、35mm/hour となっており右岸域でも浸水被害が生じる可能性が考えられる。

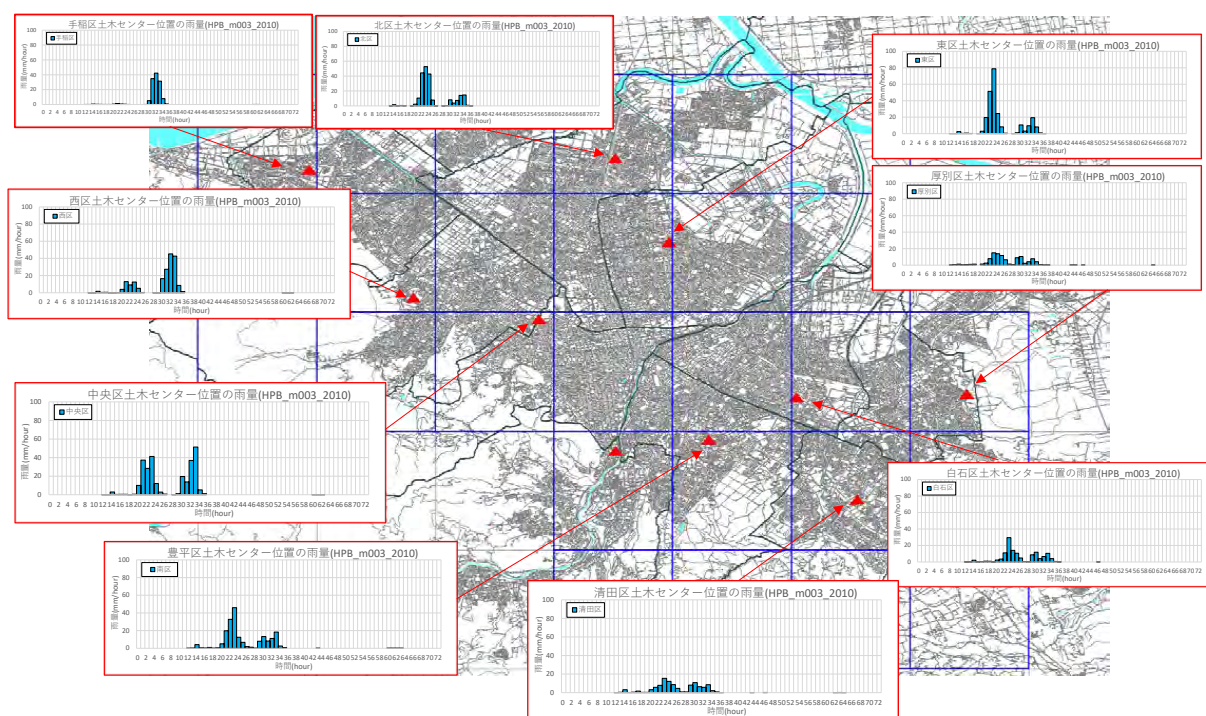


図 5.2.8 HPB_m003_2010 の時空分布

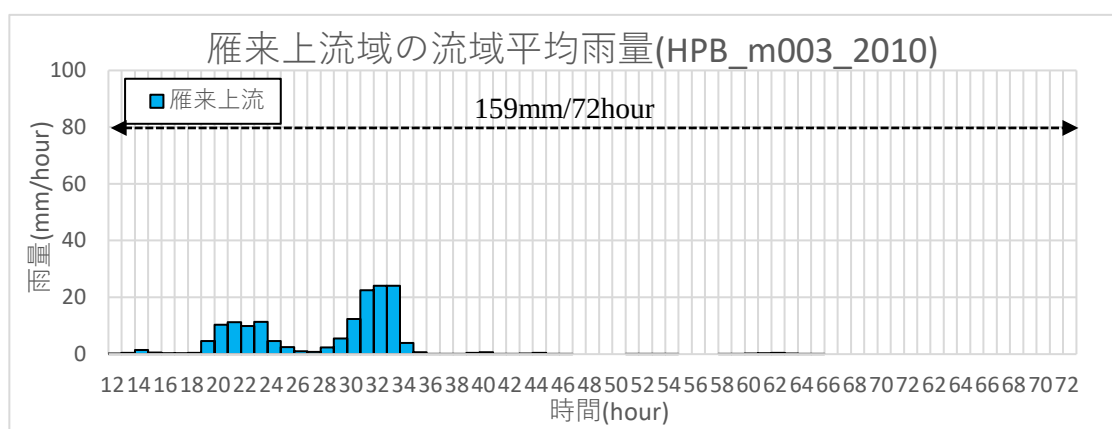


図 5.2.9 雁来地点上流の流域平均雨量

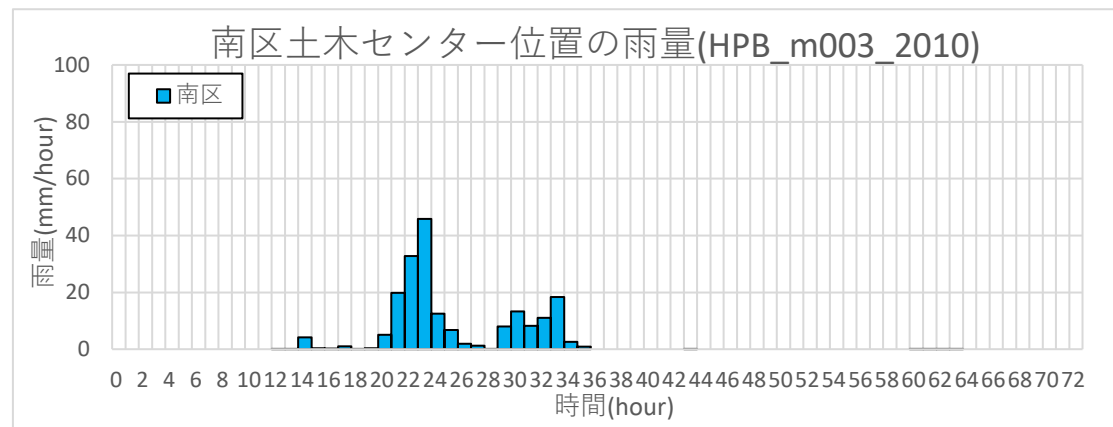
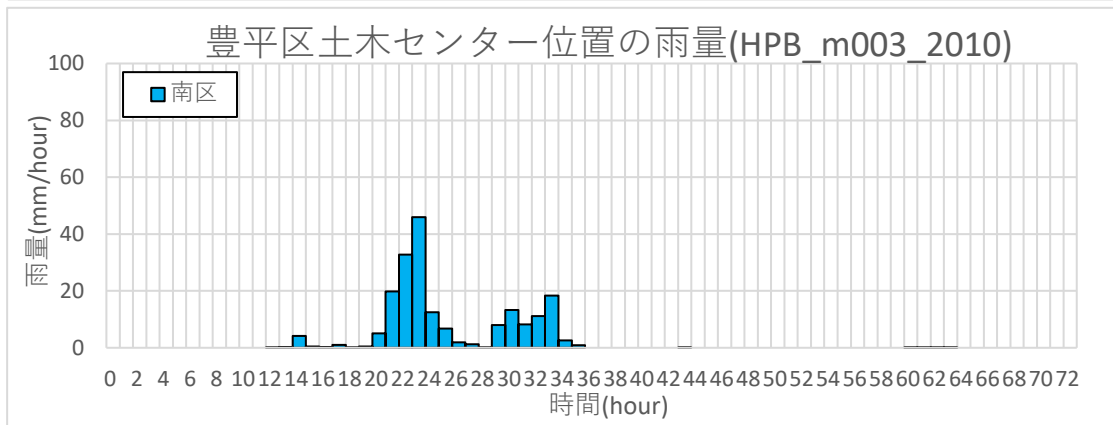
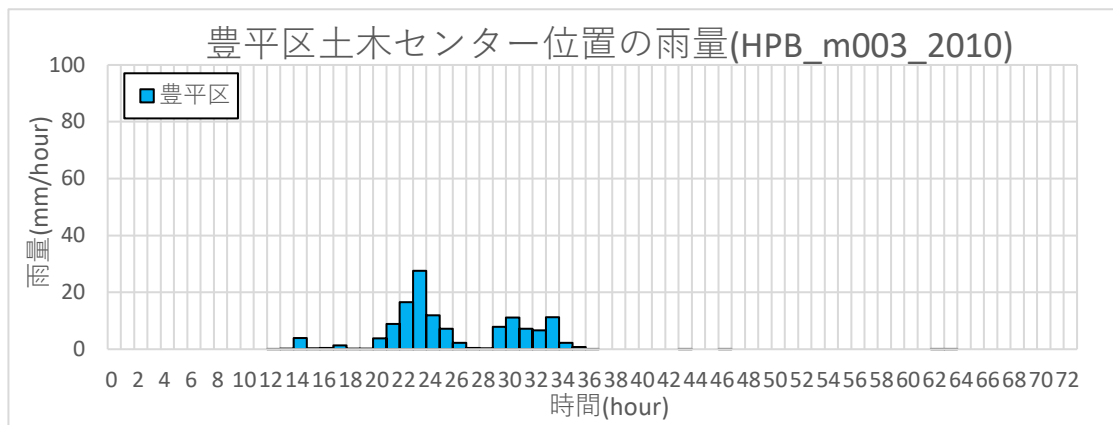
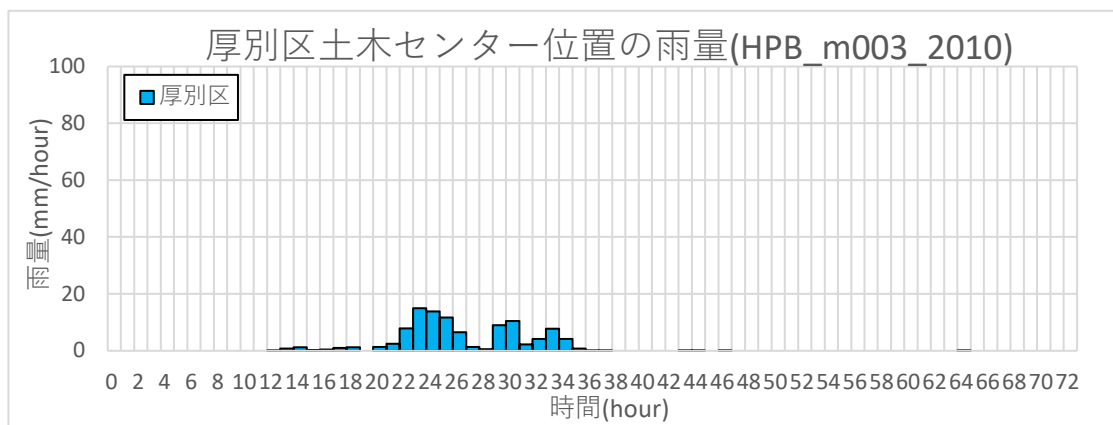


図 5.2.10 各土木センターにおける降雨量

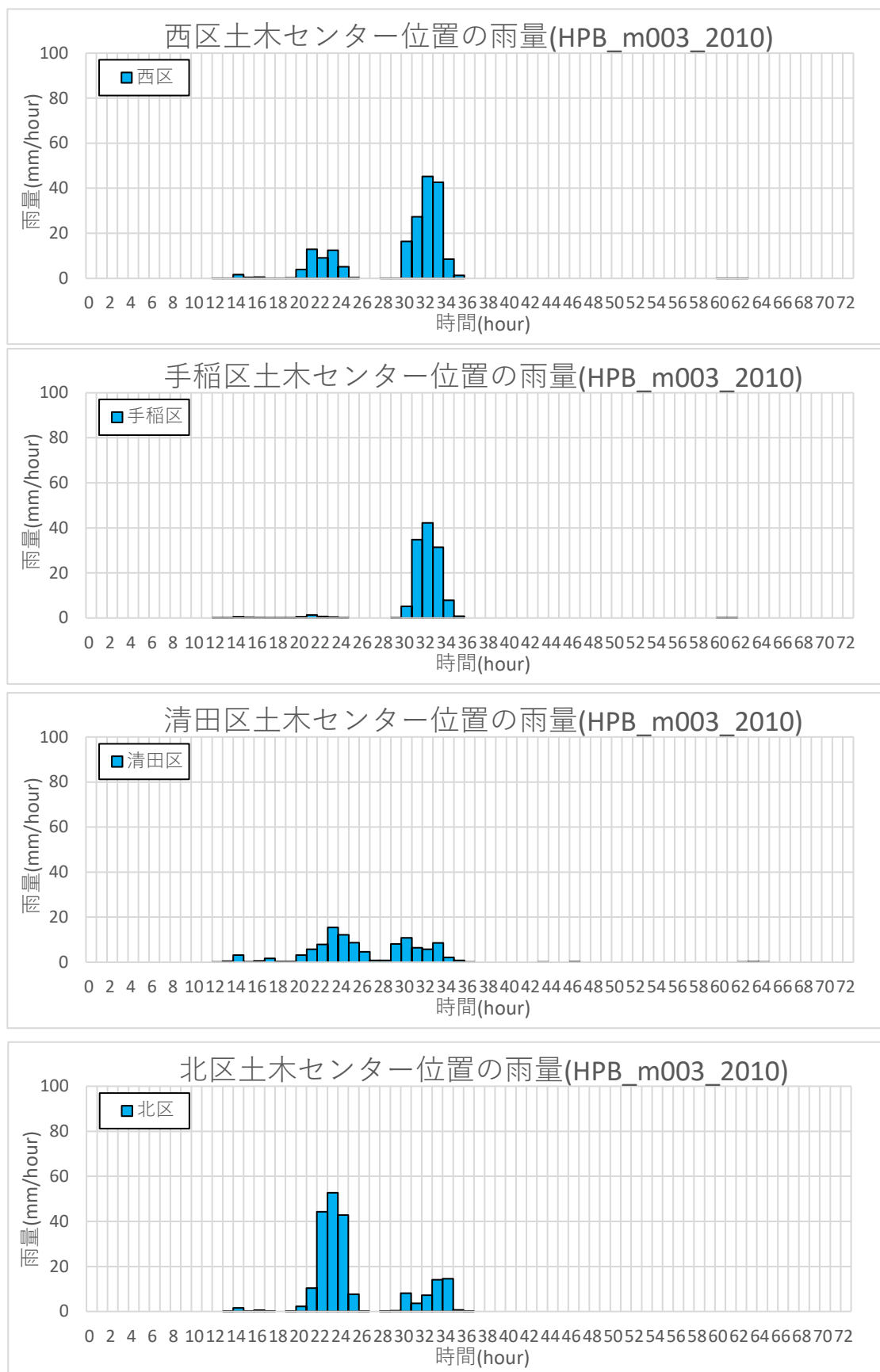


図 5.2.11 各土木センターにおける降雨量

5.2.5 各種境界条件用の流出量への変換

「HPB_m003_2010」を対象に、予測降雨量を流出計算によって境界条件となる流量に変換した。流出計算を実施するに当たり、中小河川や下水道の水害リスクを適切に評価するためにピーク降雨強度時の降雨は、中央集中型の10分雨量で補正したものをを用いた。図 5.2.12 に豊平川の流出計算結果を示しており、流出量は平成23年9月洪水の最大流量を以上となった。図 5.2.13 に中小河川の流出量を示しており、「HPB_m003_2010」の各河川の流域の降雨の時空分布によって、各河川の流出波形に差が生じる。

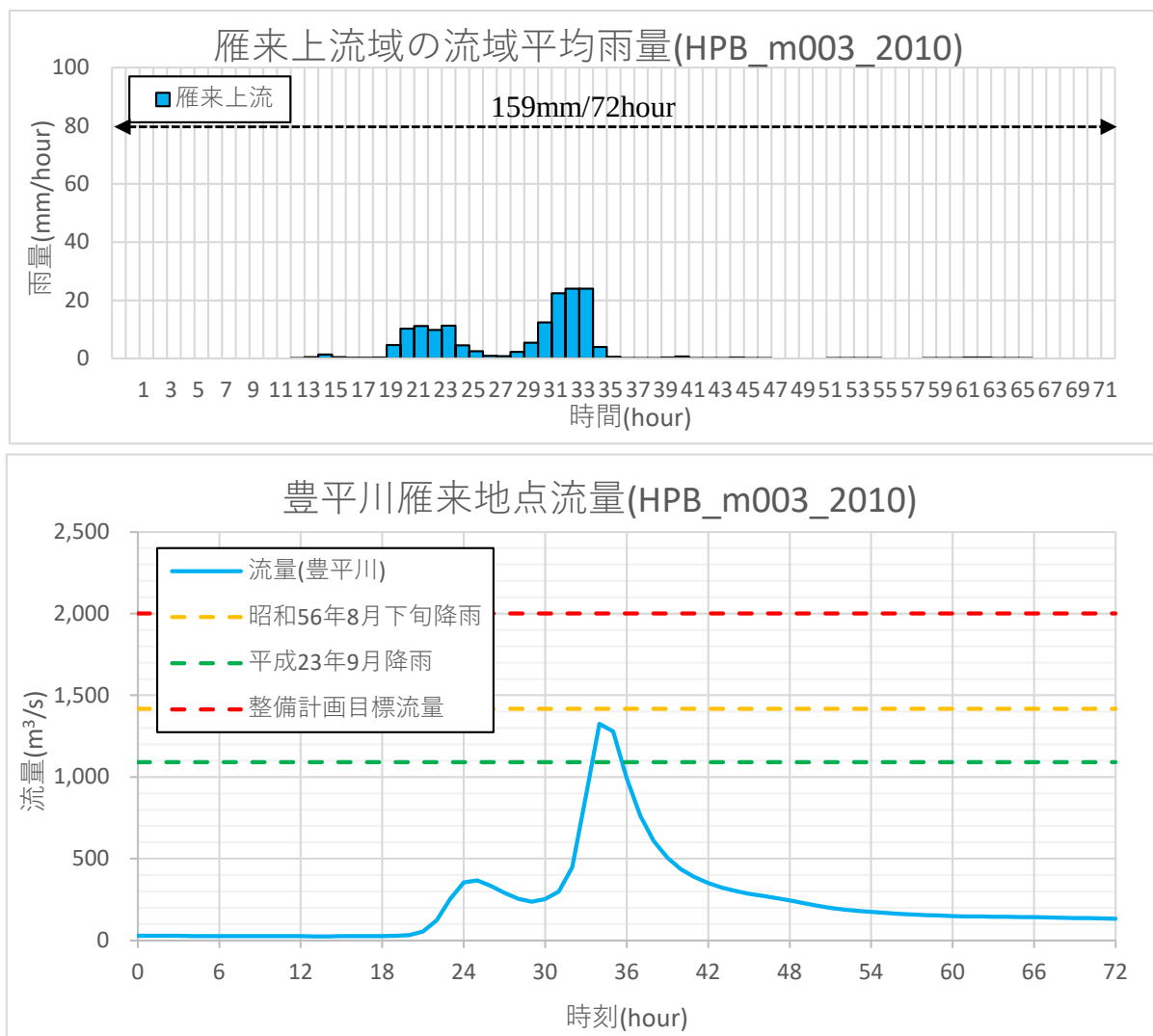


図 5.2.12 豊平川の基準地点の流出量

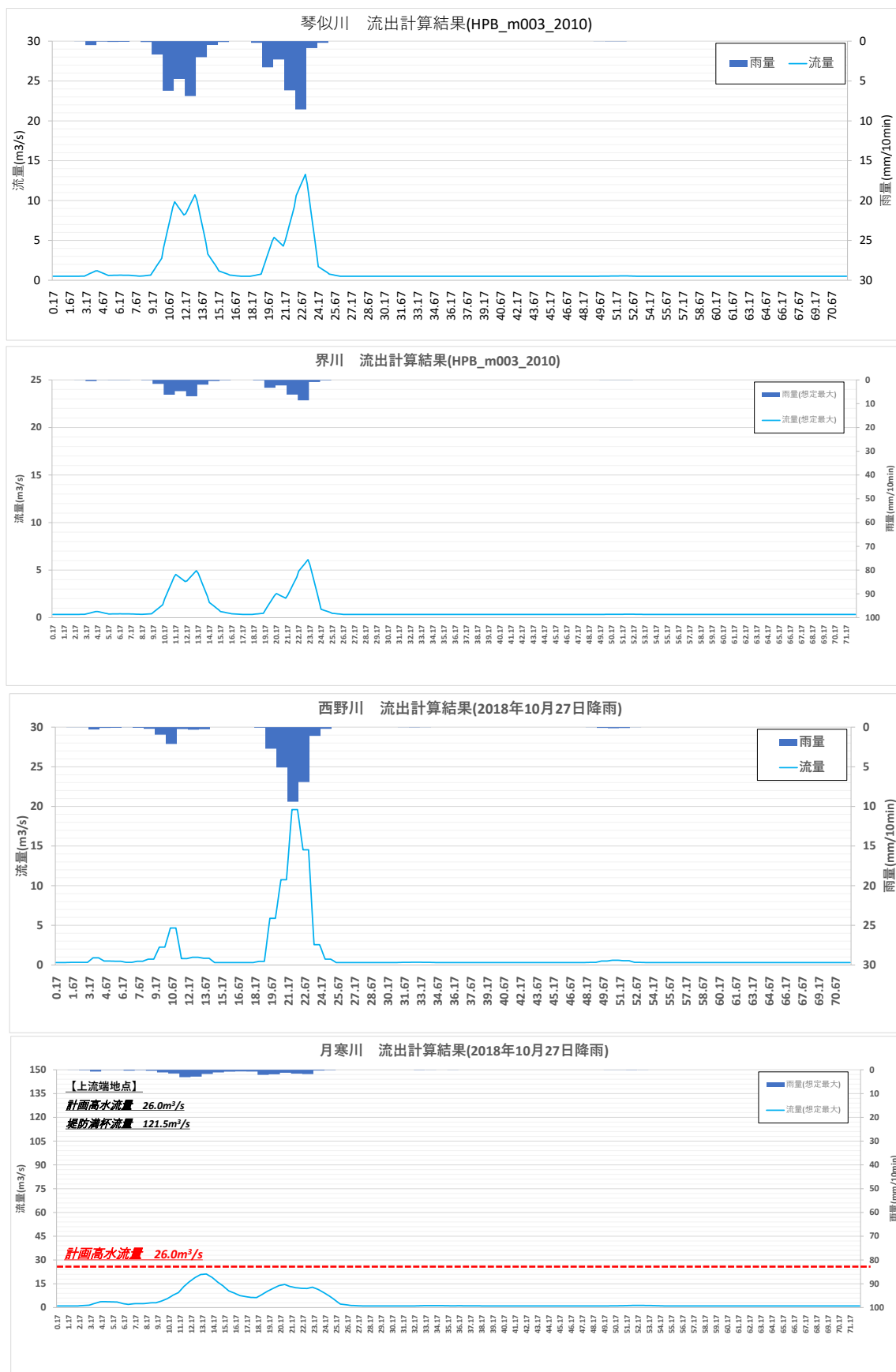


図 5.2.13(1) 中小河川の流出量 (HPB_m003_2010)

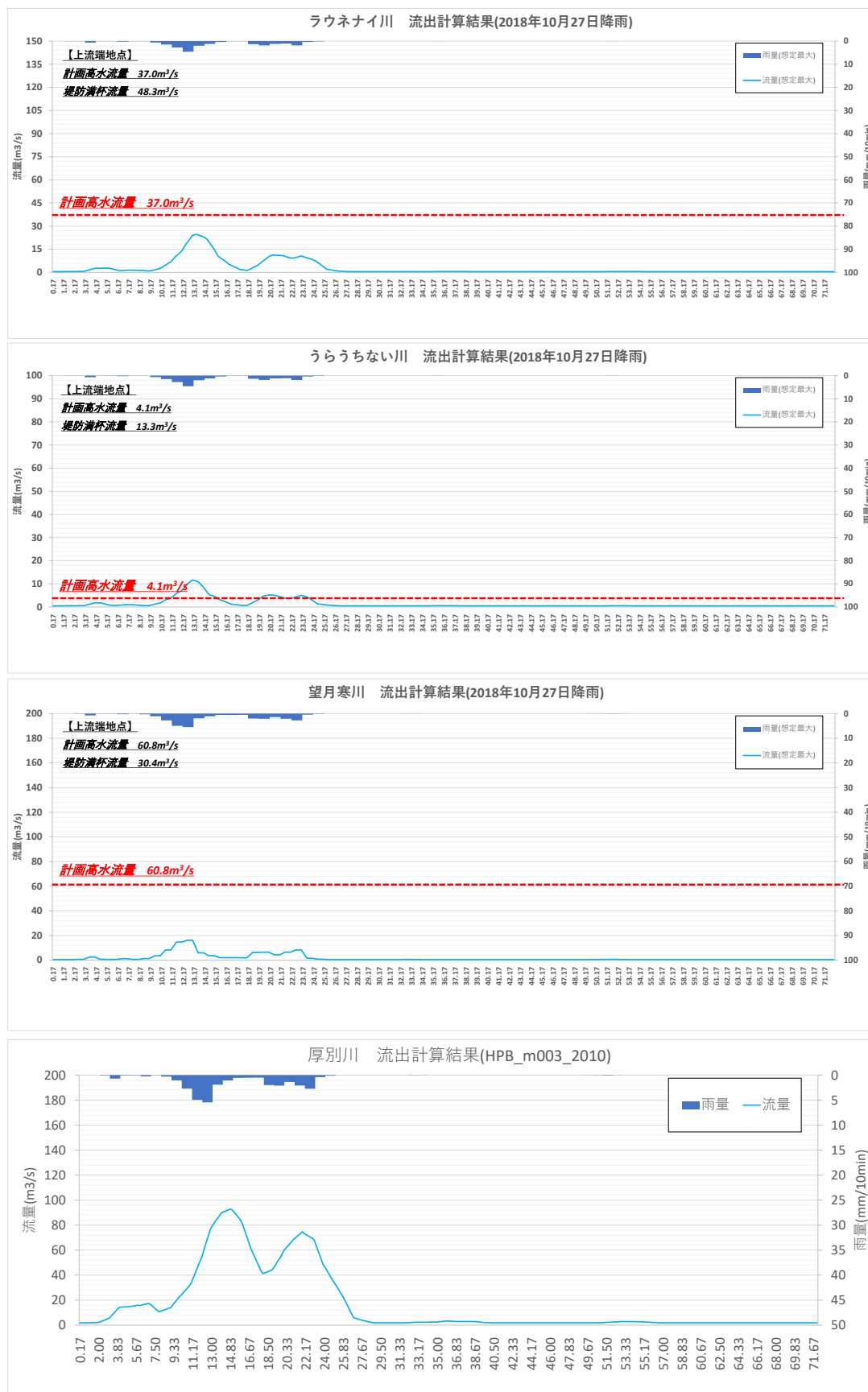


図 5.2.13(2) 中小河川の流出量 (HPB_m003_2010)

5.2.6 予測降雨データを用いた内外水同時解析の実施

「HPB_m003_2010」を対象に、内外水同時解析モデルを活用し氾濫解析を実施した。内外水同時解析によって得られた各河川のピーク水位縦断図を図 5.2.14 に示す。また、時系列での浸水区域図を図 5.2.15 に示す。これらの結果を活用することで、起こり得る降雨シナリオを想定し、圏域単位での河川の警報の想定、水位上昇時に生じている避難困難等のリスクの把握を予測(防災訓練)することが可能である。

【HPB_m003_2010 を対象とした内外水同時解析の実施】

- ・ 図 5.2.15 に時系列での浸水解析結果を示しており、札幌圏域において降雨の変化に伴い北区、白石区、西区と降雨の時間変化に応じて内水氾濫の発生が生じた。
- ・ これは、北区で札幌市における既往最大降雨が生じ、その後に豊平川右岸に位置する白石区等で内水氾濫が生じている。
- ・ 豊平川については、避難判断水位程度の洪水となっており大河川の氾濫は生じていない。
- ・ 各主要河川における避難判断水位等との比較を表 5.2.1 に示すように、整理しており起こり得る現象に対して想定される避難情報の発令のシナリオとして活用できると考えられる。

表 5.2.1 主要河川における最大水位の整理

河川名	水位の状況
豊平川（雁来）	20 時氾濫危険水位(T.P.+8.70m)を超過
厚別川(川下橋)	14 時避難判断水位(T.P.+10.88mm)を超過
望月寒川(望月寒川)	13 時避難判断水位(T.P.+10.88mm)を超過

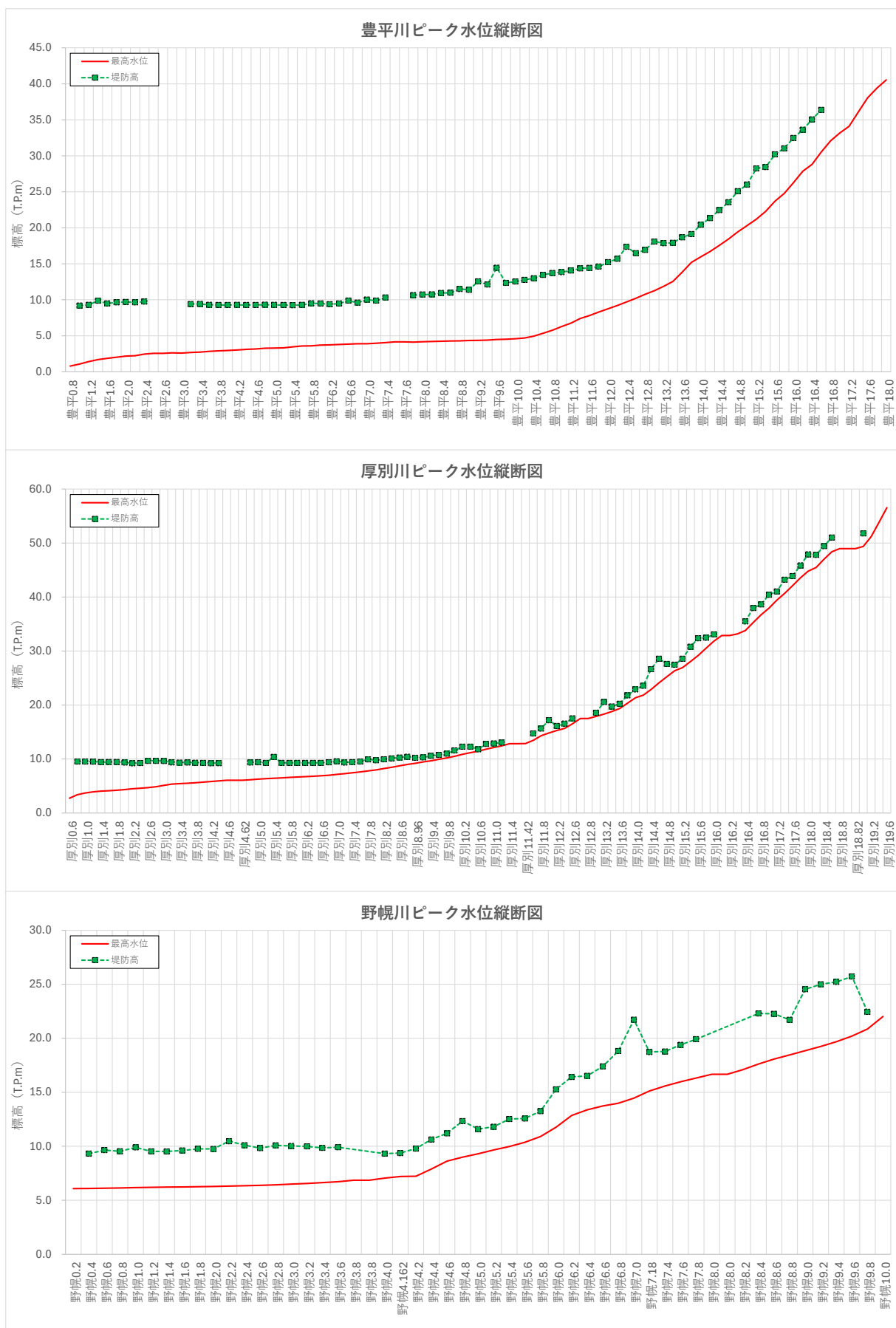


図 5.2.14 代表河川におけるピーク水位縦断面図

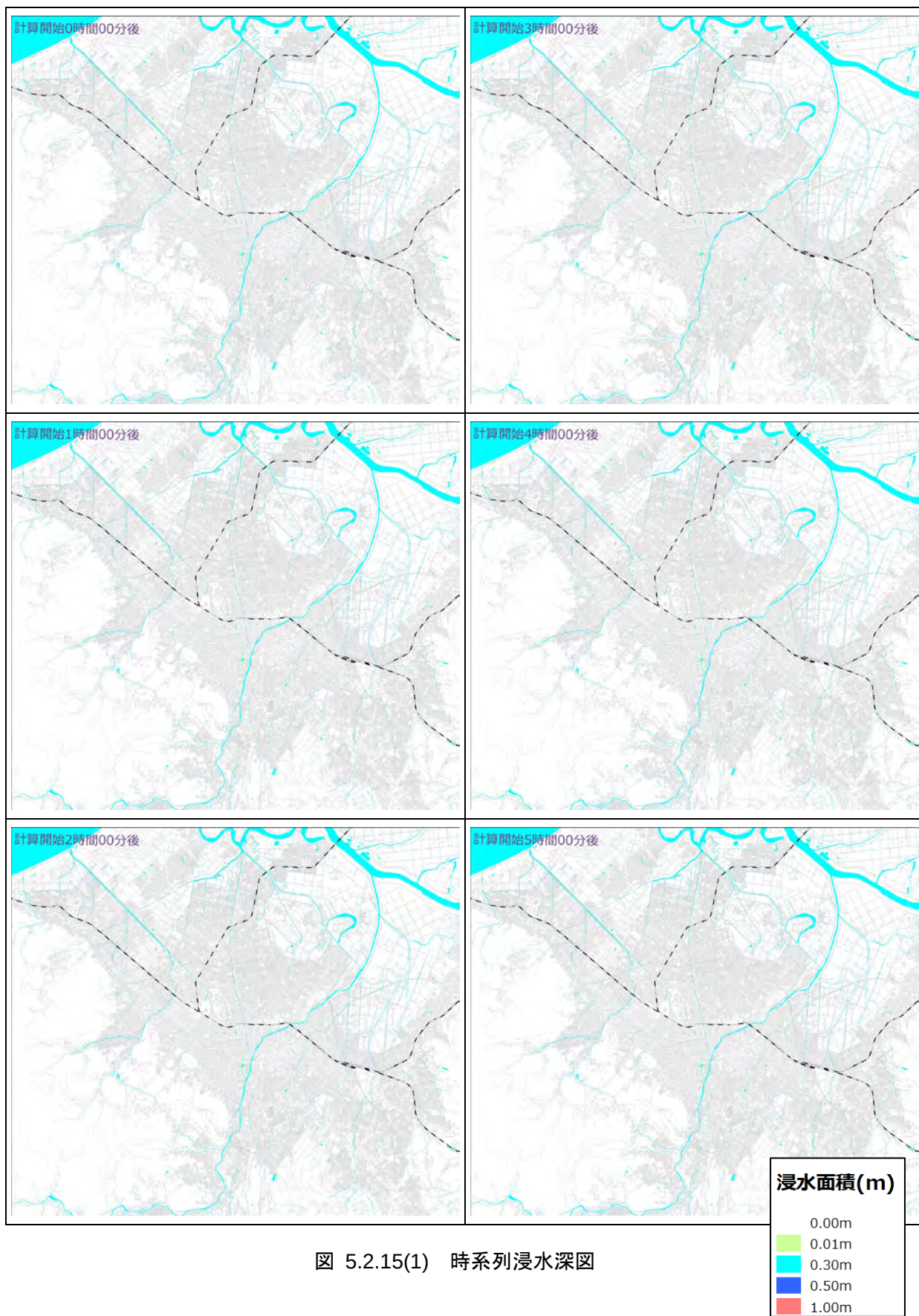


图 5.2.15(1) 時系列浸水深図



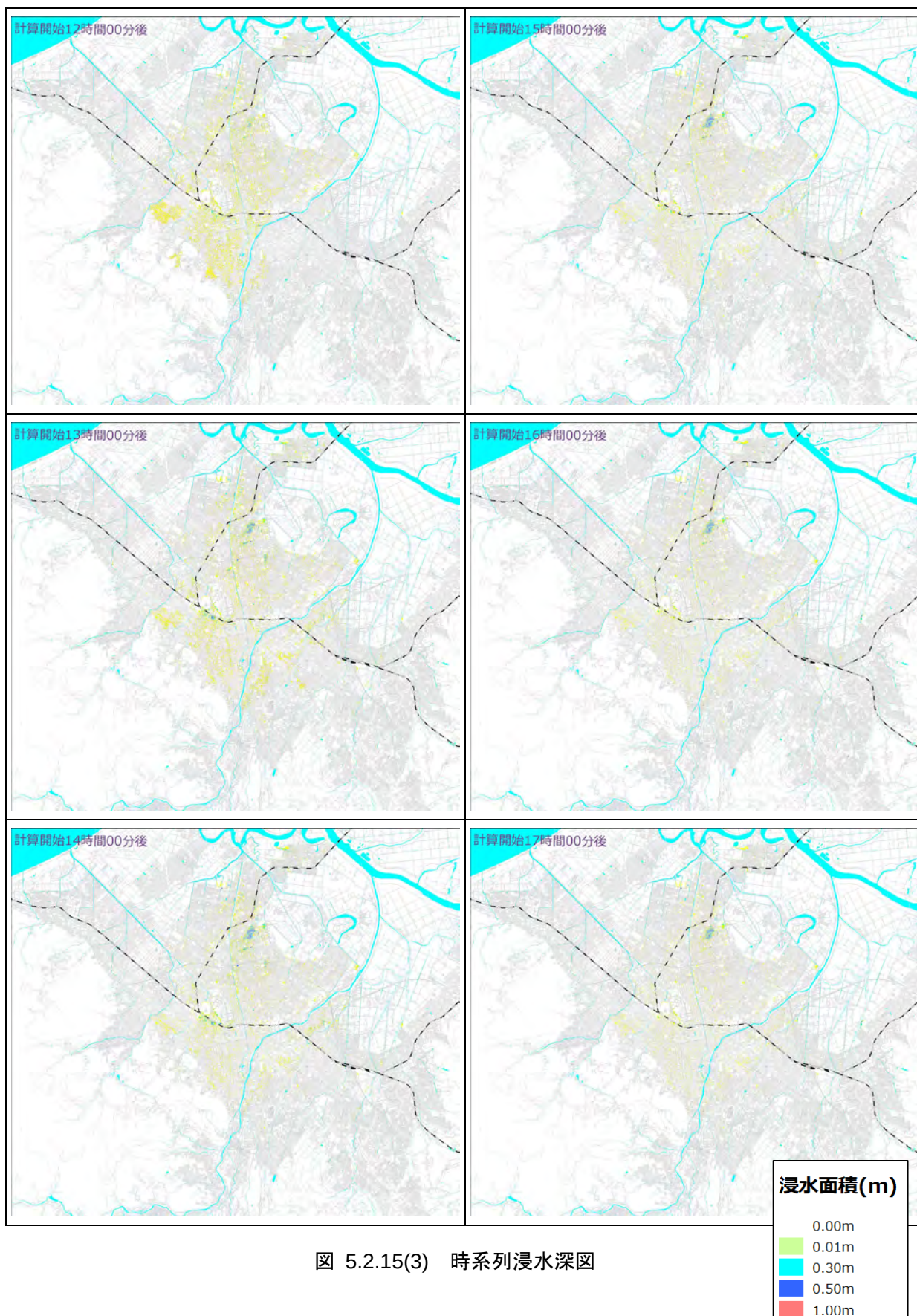


图 5.2.15(3) 時系列浸水深図



图 5.2.15(4) 時系列浸水深図

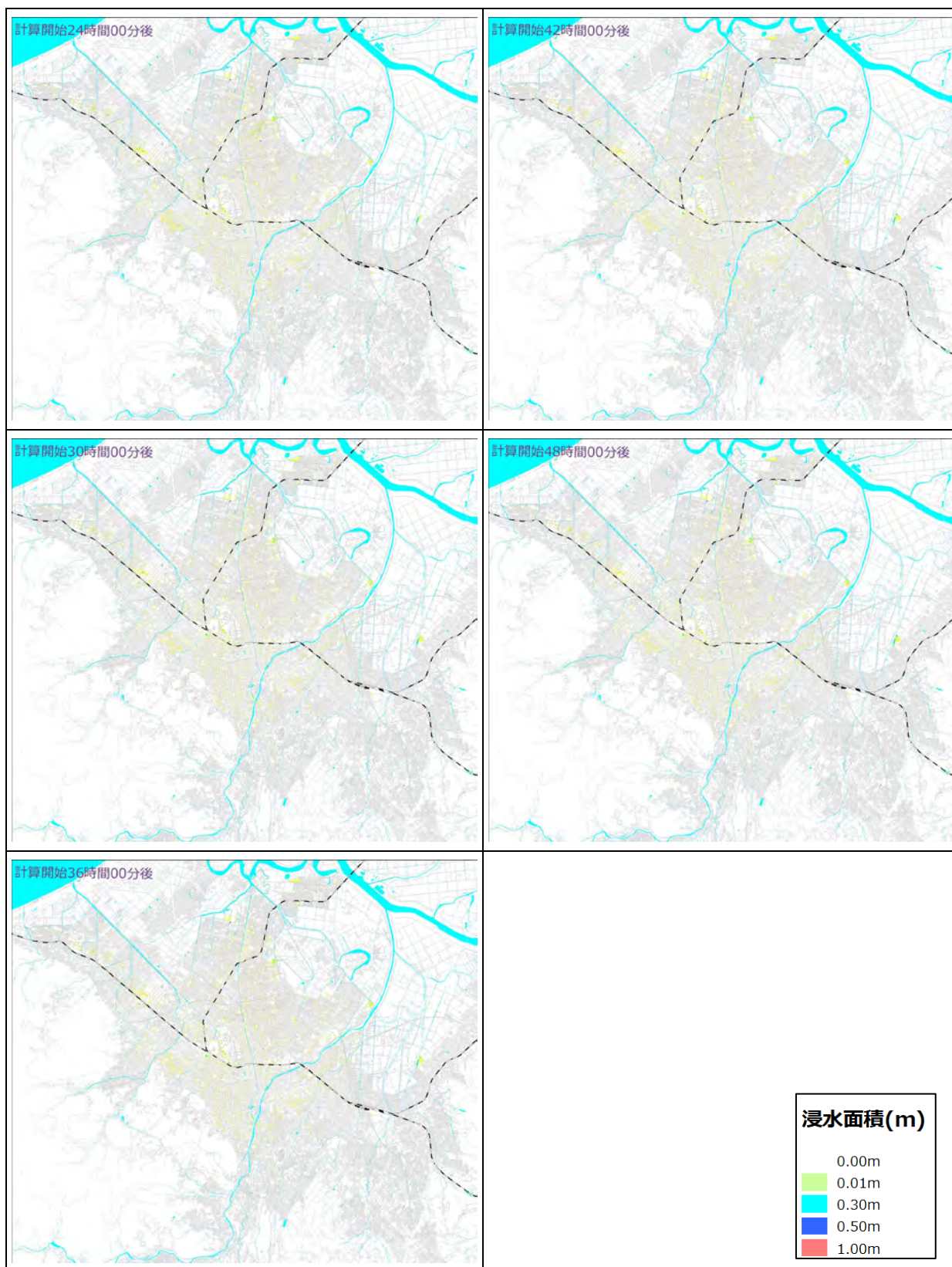


図 5.2.15(5) 時系列浸水深図

5.2.7 水害リスクの予測

図 5.2.16 と図 5.2.17 に予測される水害リスクをリスクランクとして、解析結果を図化した。図 5.2.17 に示すように東区では既往最大降雨を超過する降雨によって、避難所周辺で床上浸水や歩行困難となる水害リスクが発生している。今までに経験したことのない降雨に対する流域スケールでの水害リスクの予測が可能となった。これにより、流域内の関係機関での整備による水害リスクの軽減の重要性、広域を対象とした避難訓練への活用等が可能であると考えられる。

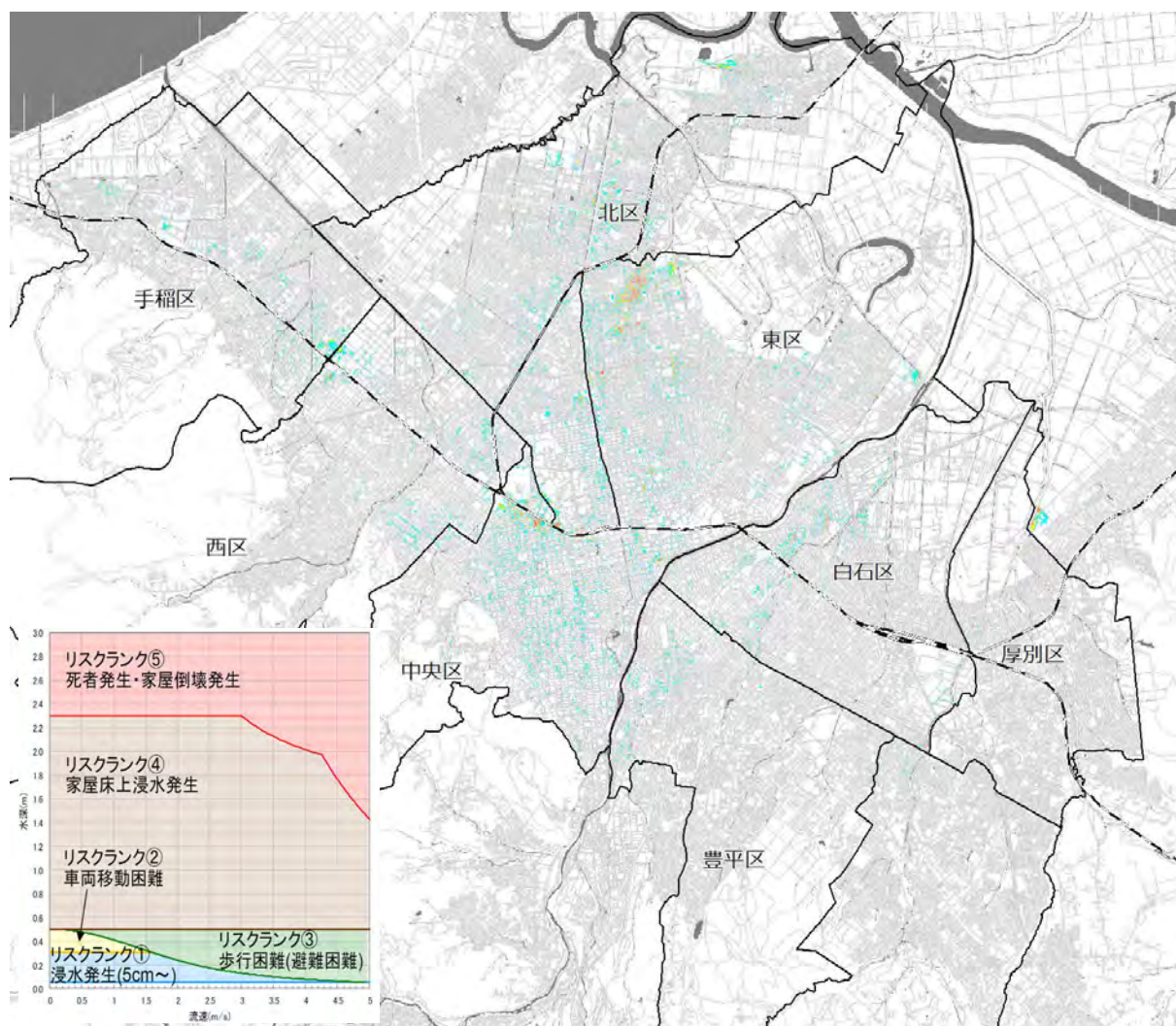


図 5.2.16 水害リスクランクによる評価の実施

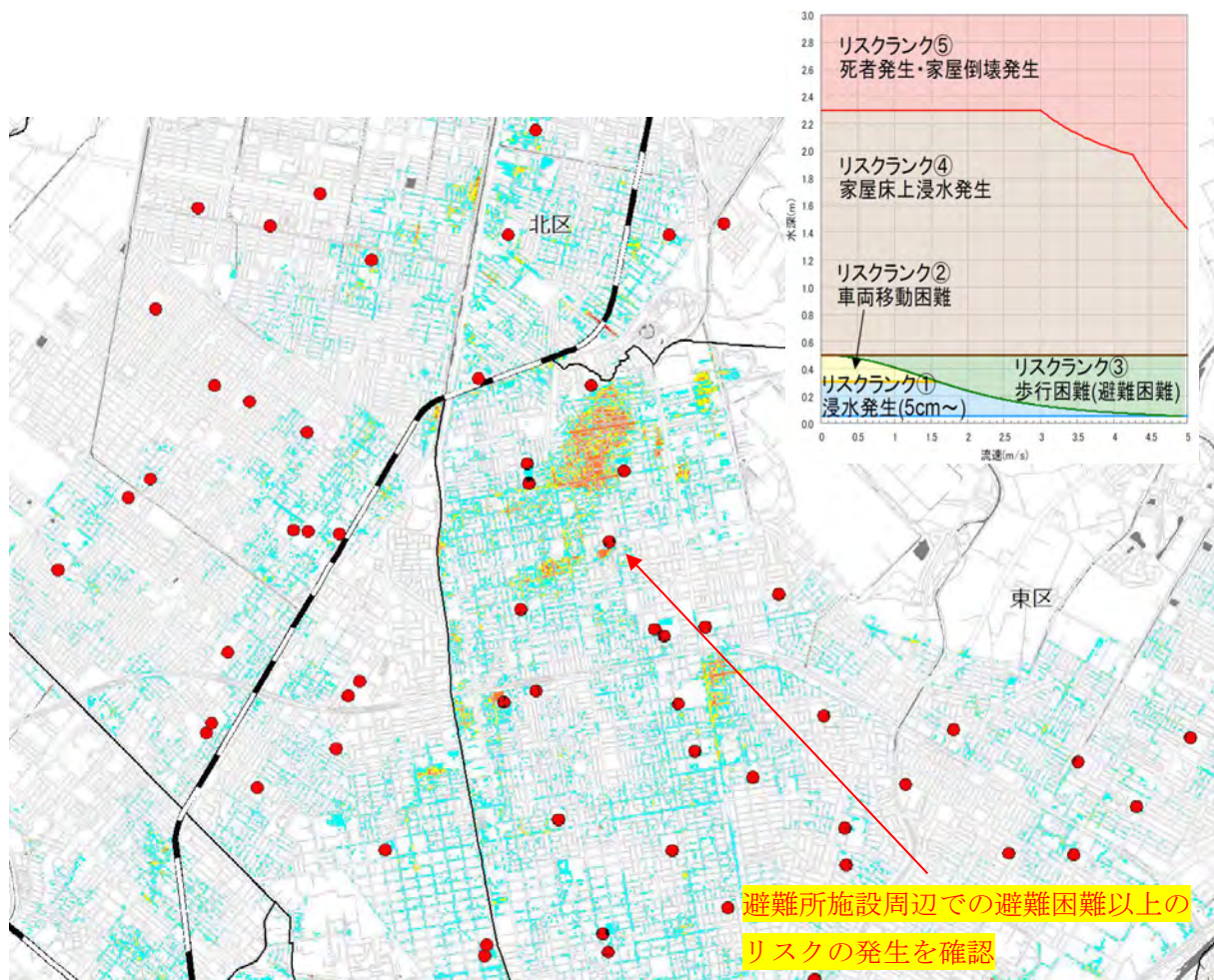


図 5.2.17 東区における床上浸水や避難困難発生箇所

第 6 章

結論

6. 結論

本研究は、浸水発生の要因となる河川と下水道を一体的に取り扱うことで、流域内における水害リスクを予測し、その結果を俯瞰することで水害リスクを評価する手法を提案した。そのために、河川から下水道までを一体的に解析可能な浸水発生メカニズムに着目した内外水同時解析手法の開発を実施した。次に、河川から下水道までの浸水被害を踏まえた降雨外力の評価手法を提案した。そして、流域内の浸水被害の発生要因を内外水同時解析から可視化し、水理量に基づく水害リスクの評価手法を提案した。最後に、アンサンブル気候予測データを境界条件とした内外水同時解析を実施し、流域全体を俯瞰した水害リスク予測手法を開発した。

6.1 まとめ

以下に、各章で得られた成果についてまとめを示す。

- ・第2章は、流域スケールでの内外水同時解析におけるモデリングについて得られた成果を以下に示す。
- ・札幌市内で発生した豪雨時における現地調査を実施し、下水道からの内水氾濫、中小河川の急激な水位上昇等の浸水発生状況について分析を実施した。
- ・現地調査に基づく知見から内水氾濫は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、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内水氾濫の要因となることを示した。このことから、下水道に流入する雨量と地表に湛水する雨量を分離するモデリング手法を提案した。
- ・管路 600mm 以上の札幌市内の 20%の管路を対象とした解析モデルによって、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。その際に、モデル化していない枝管のマンホール地点に氾濫量を分配するモデリング手法を開発した。
- ・河川と下水道に関する基礎情報と観測結果によるモデリング手法の開発から、基礎情報と観測情報の重要性と活用方法を示した。

-
- ・第3章は、内水氾濫と外水氾濫の両方を対象とした降雨外力の検討から得られた成果を以下に示す。
 - ・第2章で構築した内外水同時解析による解析結果から、大河川の氾濫に起因する数日単位の時間スケールと、中小河川や下水道の浸水被害に起因する数時間スケールの2つの軸で降雨を評価する必要性を示した。
 - ・総雨量(72時間雨量)と洪水到達時間内雨量(中小河川の降雨継続時間)(8時間雨量)の2つの軸で降雨の確率評価を実施する複合確率を提案した。
 - ・内水氾濫と外水氾濫の2つの現象に対して、流域スケールで想定すべき降雨外力の評価を実施することが可能となった。
-
- ・第4章は、内水氾濫と外水氾濫の2つの現象による水害リスクの評価方法に関する検討から得られた成果を以下に示す。
 - ・内水氾濫と外水氾濫による水害リスクを分かり易くするために、既往研究における水理量に基づく水害リスク指標を統合する水害リスクランクを提案した。
 - ・これにより、大河川の氾濫前の内水氾濫によって住民の避難困難等の水害リスクが時空間的に生じることを示し、流域スケールでの河川と下水道の一体的な解析の必要性を示した。
 - ・内外水同時解析に浸水発生要因別の追跡子を導入することで、各地先や地区の浸水発生要因を可視化する手法を開発した。
 - ・内水氾濫と外水氾濫の両面に着目したハード整備、複数の浸水発生要因を考慮した避難計画等のソフト対策の重要性と検討することが可能であることを示した。
-
- ・第5章は、起こり得る降雨シナリオに対する水害リスク予測から得られた成果を以下に示す。
 - ・第2章から第4章までに得られた知見を踏まえて、予測降雨データから札幌市内で経験したことない降雨波形を抽出し、その降雨での水害リスクを内外水同時解析で算出し、水害リスクを明らかにした。
 - ・起こり得る降雨シナリオを想定し、流域スケールでの河川の警報の想定、水位上昇時に生じている避難困難等のリスクの把握を予測(防災訓練)が可能であることを示した。

最後に、本研究では既往研究では集水区スケールで扱われてきた河川と下水道の一体解析を流域スケールかつ高解像度で実施した。流域スケールを対象とするに当たり、下水道モデルの簡略化や解析速度を高速化する方法を開発している。そして、流域スケールでの河川と下水道の氾濫解析を実現したことから、1つの時間スケールで検討されてきた降雨外力の評価を、2つの時間軸で評価する手法を提案した。さらに、河川と下水道の一体解析から得られる解析結果を、水害リスクランクとして可視化し、各地域の浸水発生要因を解明する手法を提案した。これらの成果によって、今までは、同流域内でも個別に議論されていた河川と下水道を一体的に流域スケールで議論することが可能となった。

6.2 今後の展望

本研究で開発した解析手法および水害リスク評価手法を用いて、他河川、他流域への適用を行い各河川の課題や特性に応じた更なる発展を継続的に実施していくことが重要である。

- ・本研究で開発した内外水同時解析手法を他流域に適用し、各河川の課題や特性に応じた更なる発展することが重要である。そのうえで、河川と下水道の氾濫が懸念される流域において、内外水同時解析を実施することを一般化するために必要な基礎情報や観測情報の必要性を示していくことが必要である。
- ・本研究の追跡子の導入手法は、一般的な平面二次元解析モデルに容易に適用することが可能であり様々な目的への展開が期待できる。追跡子を氾濫する河川や溢水する人孔等にするこ
とで対象地区の浸水発生要因を特定することが可能と考えられる。追跡子を導入した氾濫解析を高度化し、複数の河川からの氾濫現象の可視化等の複雑な氾濫形態の解明を実施していきたいと考えている。
- ・本論文では、d4PDF の過去実験から内水氾濫に注目した降雨外力で浸水予測を実施したが、計画規模から超過洪水までの多様な降雨外力に対して解析を実施し、普遍的な水害リスクの評価を実施したいと考えている。
- ・最後に、現在の河川と下水道という流域内で個別に議論・検討される要素を、一体的に検討することを一般化するために必要な要素、解析技術、その必要性を体系的に研究し、流域スケールで治水を議論できるようにしたいと考えている。

最後に、著者は土木技術者として、数十河川を対象に氾濫解析モデルを構築し、水害リスクの算出を実施してきた。氾濫解析は、降雨流出課程から河道内の水理現象、地形や土地利用の影響を受ける氾濫形態等、各物理現象に対して多様なモデル化と仮定を経て、水害リスクが数 m スケールの浸水深として示される。これは、既往研究や検討の積み重ねを経た、経験工学でもある土木工学の魅力と歴史を学ぶことができるテーマであると考えている。

本研究で用いた内外水同時解析は、大河川から小河川に加えて、管径 600mm の下水道管からの氾濫を扱ったものである。様々な氾濫形態を俯瞰し、何が重要であるかを分析することで、流域スケールで水害リスクを一体として議論することに新たな知見を示せたと考えている。これは、今後の治水に求められる流域における水害リスクを俯瞰し、議論していくことの一助になると考えている。

そして、今後も土木技術者・研究者として、自然に対する学術的な知識や理解の研鑽を続け、安全に安心して人々が暮らせる基盤を作る「治水」に尽力することを記す。

Acknowledgements

初めに、北海道大学山田朋人教授には 5 年にわたるご指導をいただきまして心から感謝申し上げます。博士論文に記した研究にとどまらず、自然科学の魅力、土木工学の在り方等の多くのごことをご教示いただいたことに深く感謝いたします。

また、副査を引き受けてくださった同大学泉典洋教授、渡部靖憲教授、石塚宗司特任教授、岩崎理樹准教授には研究に関する議論をしていただきました。深く感謝申し上げます。博士論文の審査を引き受けてくださった同大学西村聡教授、猿渡亜由未教授、石川達也教授、渡部要一教授、内田賢悦教授、長井宏平教授、稲津将教授には、審査にかかわる議論をしていただきました。心より感謝申し上げます。

同大学工学部河川・流域工学研究室の皆様との議論や研究活動は、私の研究や科学的知見を深める上で非常に良い経験でした。研究室の皆様にも心よりお礼申し上げます。研究室の皆様には、広聴会の発表練習、当日準備等にも尽力いただき感謝しております。

建設技術研究所の皆様にも心よりお礼申し上げます。特に、北海道支社技術部の川村育男部長、東北支社の永矢貴之支社長には、博士課程への挑戦への後押し、研究論文へのご助言等の多くのサポートをいただいたことに感謝を申し上げます。また、東京本社河川部の加藤千恵部長には、広聴会に向けた準備等に対して多大な配慮をいただけたことに感謝申し上げます。今後、博士課程に挑戦する後進に私自身もサポートしていきたいと思えます。

そして、多くの基礎情報や観測情報を提供いただいた国土交通省北海道開発局、北海道、札幌市の方々にも感謝申し上げます。

最後に、いついかなるときも傍で見守り続けてくれた家族に心から感謝します。

研究業績

国内論文（査読付き）

1. 米田駿星, 佐藤誠, 川村育男, 山口昌志, 松本勝治, 山田朋人：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 2018.
2. 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, 2019.
3. 米田駿星, 佐藤誠, 川村育男, 山田朋人：内外水同時解析による浸水発生要因に着目した浸水被害特性の評価手法の提案,河川技術論文集, Vo.27, 2021.
4. 米田駿星, 川村育男, 大川重雄, 佐藤誠, 山田朋人：大量アンサンブル気候データを活用した複合確率による降雨外力評価方法の提案,土木学会論文集 B1(水工学) Vo.77,No.2 2021.
5. 米田駿星, 佐藤誠, 川村育男, 山田朋人：都市部における将来予測降雨データの活用に向けた降雨の時空間解像度と浸水特性の関係性,河川技術論文集, Vo.30, 2024.

国内論文（共著含む）

1. 米田駿星, 佐藤誠, 江口陽祐, 山田朋人：内外水同時解析を用いた浸水特性の分析
2. 植村 郁彦, 鈴木 章弘・石原 道秀・米田 駿星・星野 剛・山本 太郎・山田 朋人：気候予測データに基づく災害シナリオ作成～自治体災害支援システム IDR4M を活用した避難情報の発令判断支援に向けて～
3. 鈴木 章弘・植村 郁彦・星野 剛・米田 駿星・山本 太郎・橋本 慎一・山田 朋人：気候予測データベースを活用した自治体の避難判断支援のための防災研修
4. 米田駿星, 佐藤誠, 江口陽祐, 山田朋人：浸水発生要因の可視化による浸水被害特性の評価手法の提案

国内発表

1. 米田駿星, 佐藤誠, 川村育男, 山口昌志, 松本勝治, 山田朋人: 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 2018.
2. 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, 2019.
3. 米田駿星, 佐藤誠, 川村育男: 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, 第 20 回建設コンサルタント業務研究発表会 (令和 2 年 9 月 15 日)
4. 米田駿星, 佐藤誠, 川村育男, 山田朋人: 内外水同時解析による浸水発生要因に着目した浸水被害特性の評価手法の提案, 河川技術論文集, Vo.27, 2021.
5. 米田駿星, 川村育男, 大川重雄, 佐藤誠, 山田朋人: 大量アンサンブル気候データを活用した複合確率による降雨外力評価方法の提案, 土木学会論文集 B1(水工学) Vo.77, No.2 2021.
6. 米田駿星, 佐藤誠, 江口陽祐, 山田朋人: 内外水同時解析を用いた浸水特性の分析
7. 米田駿星, 佐藤誠, 江口陽祐, 山田朋人: 浸水発生要因の可視化による浸水被害特性の評価手法の提案
8. 米田駿星, 佐藤誠, 川村育男, 山田朋人: 都市部における将来予測降雨データの活用に向けた降雨の時空間解像度と浸水特性の関係性, 河川技術論文集, Vo.30, 2024.

国際発表

1. Proposal Of A Method For Predicting Flood Risk For Unexperienced Rainfall Using Climate Change Prediction Information, GEWEX2024

受賞

1. 令和 2 年 9 月 優秀賞受賞: 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, 第 20 回建設コンサルタント業務研究発表会 (令和 2 年 9 月 15 日)
2. 令和 5 年 3 月 地球環境優秀講演賞受賞: 米田駿星, 山田朋人ら: 内外水同時解析を用いた浸水特性の分析

References

- [1] 国土交通省河川局治水課：浸水想定区域図作成マニュアル，2005.6.
- [2] 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），建設省土木研究所 河川部都市河川研究室，1996.2.
- [3] 川池健司，井上和也，林秀樹，戸田圭一：都市域の氾濫解析モデルの開発，土木学会論文集 No.698/Ⅱ-58，pp.1-10，2002.2.
- [4] 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策の研究，土木学会論文集，No.600/Ⅱ-44，pp.23-36，1998.
- [5] 井上和也，川池健司，林秀樹：都市域における氾濫解析モデルに関する研究，水工学論文集，第 43 巻，pp.533-538，1999.2.
- [6] 中川一ら：住区内での浸水を考慮した洪水氾濫の実験と解析，京都大学防災研究所年報 第 47 号 B，pp.517-526，2004.
- [7] 国土交通省北陸地方整備局：急流河川における浸水想定区域検討の手引き，2003.9.
- [8] 北海道開発局開発土木研究所，株式会社水工リサーチ：平成 11 年度施行豊平川氾濫模型実験業務報告書，2000.3.
- [9] 土木学会：水理公式集例題プログラム集，平成 13 年版，河川編.
- [10] 土木学会：水理公式集，平成 11 年版.
- [11] 平成 26 年 9 月 11 日豪雨に伴う対応状況等について（最終報）：http://www.city.sapporo.jp/kikikanri/260911_suigai.html
- [12] 国土交通省水管理・国土保全局：第 2 回 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会，2018.

- [13] 小林彩佳, 岡地寛季, グエンレズン, 山田朋人:降雨観測の空間分布と気象予測に起因する山地流域における降雨量と河川流量の不確実性, 地球環境研究論文集, 第 73 巻, pp.I_63-I_69, 2017.
- [14] 札幌市浸水ハザードマップ: <http://www.city.sapporo.jp/gesui/01yakuwari/seibizyukyou-hukyuuritu.html>
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 国土政策総合研究所: 都市域氾濫解析モデル, <http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/seika.files/nilim/download.html>
- [18] 国土交通省河川局: 治水経済調査マニュアル(案),2005.
- [19] 国土交通省水管理・国土保全局: 水害の被害指標分析の手引(H25 施行版),2013.
- [20] 社団法人 日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と同解説 前編 -2001 年度版-, pp182-185, 2001.
- [21] 大西良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用, 水工学論文集,第 52 巻, pp.841-846, 2008.
- [22] 洪水浸水想定区域図作成マニュアル(第 4 版) H27.7
- [23] 中小河川洪水浸水想定区域図作成の手引き (第 2 版) 平成 28 年 3 月
- [23] 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.

- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 国土交通省: 平成 28 年に発生した水害の概要, 2018
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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/>
- [31] 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.
- [32] 国土交通省: 令和元年台風第 19 号による被害等, 2019.
- [33] 国土交通省: 令和 2 年 7 月豪雨による被害と対応, 2020.
- [34] 国土交通省: 内水浸水想定区域図作成マニュアル (案), 平成 28 年 4 月
- [35] 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.

- [36] 中島秀明,田中耕司,中北英一,竹之内健介,矢守克也,養老伸介,羽生雅則：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.
- [37] 武田誠,野々部竜也,橋本善毅,松尾直規：春日井市の内水氾濫解析と雨水の移動の可視化に関する検討,土木学会論文集 B1(水工学),Vol.72,No.4,pp.I_13-18,2018.
- [38] 岩佐義朗,井上和也,水鳥雅文：氾濫流の水理の数値解析法, 京都大学防災研究所年報,第 23 号 B-2,pp305-317,1980.
- [39] 三浦心,川村育男,木村一郎,三浦敦禎：扇状地に発達した密集市街地における氾濫解析手法に関する検討,土木学会論文集 B1(水工学),Vol.55, No.4.
- [40] 国土技術政策総合研究所：都市域氾濫解析モデル, <http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/seika.files/nilim>
- [41] 村上智一,鵜飼亮行,野口幸太,河野裕美,水谷晃,下川信也,中瀬浩太,吉野純：西表島網取湾における土砂輸送の粒子追跡解析,土木学会論文集 B3(海洋開発),Vol.69, No.2,I_1928-I_1933,2013.
- [42] 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.
- [43] 札幌市下水道河川局：札幌市下水道ビジョン 2030.
- [44] 国土交通省：水害の被害指標分析の手引(H25 施行版),2013.
- [45] 大西良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一：地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用, 水工学論文集,第 52 巻, pp.841-846, 2008.
- [46] 気象庁：令和元年東日本台風(風第 19 号)による大雨, 暴風等,令和元年(2019 年)10 月 10 日～10 月 13 日 (速報), 2019.

- [47] Mizuta, R., and Coauthors: Over 5,000years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models, Bulletin of the American Meteorological Society, 98(7), 1383-1398, 2016.
- [48] 舩屋繁和, 植村郁彦, 吉田隆年, 大村宣明, 千葉学, 戸村翔, 山本太郎, 時岡真治, 佐々木博文, 濱田悠貴, 星野剛, 山田朋人: 実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく不確実性を考慮した将来気候下での確率雨量:学会論文集 B1(水工学), Vol. 74,I_121-I_126, 2018.
- [49] 橋本健, 牧野博昭: d4PDF 降水量データを用いた治水計画への不確実性の導入に関する検討,水文・水資源学会 2018 年度研究発表会,2018.
- [50] Yamada, T. J. :Adaptation measures for extreme floods using huge ensemble of high-resolution climate model simulation in Japan, Summary report on the eleventh meeting of the research dialogue, 28-30, UNFCCC Bonn Climate Change Conference, Bonn, Germany. 2019.
- [51] Shimizu, K.; Yamada, T.; Yamada, T.J. Uncertainty Evaluation in Hydrological Frequency Analysis Based on Confidence Interval and Prediction Interval. Water, 12, 2554, 2020.
- [52] 国土開発技術研究センター: 高水計画検討の手引き(案),平成 12 年 10 月
- [53] 椎葉充晴, 立川康人: 総合確率法の数学的解釈,土木学会論文集, B1(水工学), Vol. 69, No.2, pp.101-104, 2013.
- [54] 松田誠祐, George D.Uligan, 大年邦雄, Seisuke MATSUDAG, eorge D. ULIGAN and Kunio OHTOSH: 豪雨の時間集中度に基づく確率 1 時間雨量の推定法, 水工学論文集,第 40 巻,pp279-284,1996.
- [55] 社会資本整備審議会河川分科会: 気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会 (第 1 回), 2019.
- [56] 山田朋人, 星野剛: 北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化, 河川技術論文集, 第 24 巻, 2018.

- [57] 建設省：河川砂防技術基準(案)(改訂新版)同解説 調査偏, 平成24年6月
- [58] 吉野文雄：合理式による洪水流量の算定 についての提案, 第27回 建設省技術研究会
- [59] 北野利一, 山地秀幸, 川崎将生.: 2 変量 GP 分布による降水量の同時生起頻度の推定法-数学的なアイデアと現実データの接続. 土木学会論文集 B1 (水工学), 74(4), I_319-I_324, 2018.
- [60] 国土交通省水管理・国土保全局：第2回 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会, 2018.
- [61] 実験デザイン・利用手引き | 地球温暖化対策に資するアン サンプル気候予測データベース , <http://www.mirocgcm.jp/~pub/d4PDF/design.html>.
- [62] 吉岡伸隆, 井手淨, 守田優, 平林由希子：地球温暖化による豪雨の変化と都市河川洪水への影響, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.76, No.2, I_55-I_60, 2020.
- [63] 戸田 敦仁, 尾崎平, 石垣 泰輔, 橋本 彰博, 戸田 圭一：d4PDF を用いた将来降雨に基づく内水氾濫解析, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.76, No.2, I_727-I_732, 2020.
- [64] 気象庁技術資料(HTTP-GET 仕様書), 気象庁.
- [65] 馬場康之, 石垣泰輔, 戸田圭一, 中川 一：物大階段およびドア模型を用いた地下空間からの避難に関する水理実験, 京都大学防災研究所年報. No.48 B, 2011.
- [66] B. Dong, J. Xia, M. Zhou, et al., Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles, Science of the Total Environment (2021).
- [67] C. Montalvo, J.D. Reyes-Silva, E. Sanudo L. Cea, J. Puertas, et al., Urban pluvial flood modelling in the absence of sewer drainage network data: A physics-based approach, Journal of Hydrology 634 (2024).