

# 都市浸水予測技術による豪雨時の神田川流域の 雨水排除機能と浸水危険度に関する評価

## PREDICTION TECHNIQUE OF URBAN INUNDATION IN THE KANDA RIVER BASIN AND ESTIMATION OF INUNDATION RISK

関根正人<sup>1</sup>・浅井晃一<sup>2</sup>・関根貴広<sup>2</sup>

Masato SEKINE<sup>1</sup>, Koichi ASAI<sup>2</sup>, Takahiro SEKINE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 早稲田大学理工学術院教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

<sup>2</sup> 学生会員 早稲田大学大学院創造理工学研究科 (同上)

Recently, localized torrential rain occurs frequently. The Kanda river basin is a highly-urbanized area located next to the Tokyo metropolitan area. In this area, most ground was paved, and highly density drainage network has been constructed under the ground. Because of such condition, rain water concentrates to the drainage pipe rapidly, and it flows into urban river. In this study, numerical simulation was conducted to investigate the process of urban inundation in this basin by considering the interaction between drainage system and river. As a result of this analysis, we found out the characteristics of inundation in this area. In addition, the process of inundation was clarified by focusing on the characteristics of drainage system and reverse flow from river to drainage pipe.

*Key Words :urban inundation, localized torrential rain, drainage network, urban river,  
numerical prediction*

### 1. 序論

地球規模で気候の変動とその極端化が進行するのに伴って、東京などの大都市でも設計強度をはるかに超えるような豪雨が頻発するようになった。最近では、2013年10月に伊豆大島で甚大な土砂災害を引き起こした台風26号によって、都内23区でも広い範囲にわたって100～200mm規模の豪雨に襲われた。このとき神田川流域に建設された都道環状七号線下の地下調節池（以下、環七地下調節池と記す）では、貯水容量540,000m<sup>3</sup>の約80%にあたる河川水を取水し、事なきを得た。しかし、もしさらに長時間にわたって降雨が継続していたとすると、深刻な被害になった可能性がある。近年のこうした状況を考慮すると、東京がこれまでに経験したことのない豪雨に遭うことは十分に考えられ、このような豪雨に備えた被害軽減対策が求められる。具体的には、豪雨時の浸水危険度をこれまで以上の精度で評価できるようにするだけでなく、予想される被害の状況やプロセスをリアルタイムで知ることができるようにすることが重要である。

本研究では、東京23区を西から東に横切って流れる

神田川流域を検討の対象とする。この区域には山の手の大地を刻み込むように神田川とその支川である善福寺川・妙正寺川・江古田川が流れている。この流域には、高密度に張りめぐらされた下水道ネットワークが整備されている。このため、市街地に降った雨は、まず下水道に取り込まれ、その後ネットワーク内を流れ下り、短時間のうちに河川へと運ばれる。すなわち、雨水排除の役割を担う下水道と神田川水系の河川は連続したひとつのシステムとして機能しており、豪雨により都市浸水が発生すると、同時に河川では洪水が生じることになる。これまでの整備により、河川には環七地下調節池をはじめとした多くの調節池や分水路が整備されている。また、下水道施設として和田弥生幹線下水道をはじめとした貯留施設や、ポンプ場・水再生センターなどがつくられている。これらによって浸水・氾濫被害の発生を抑え、あるいは軽減化させてきたが、これまでに経験したことのない豪雨に対してどの程度有効かは定かではない。

神田川流域などの都市域に降った雨が都市河川にどのように流れ出てくるのかについては、長年にわたり雨水流出解析として研究されてきた。しかし、下水道ネットワークを構成する個々の下水管の排水能力についてまで

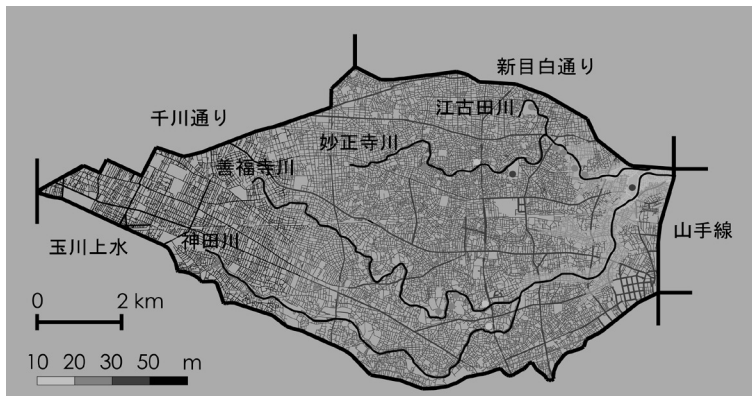


図-1 対象区域の道路面標高コンター図：図中の●は水再生センター，  
●は調節池，●環状七号線地下調節池の取水口を表す。

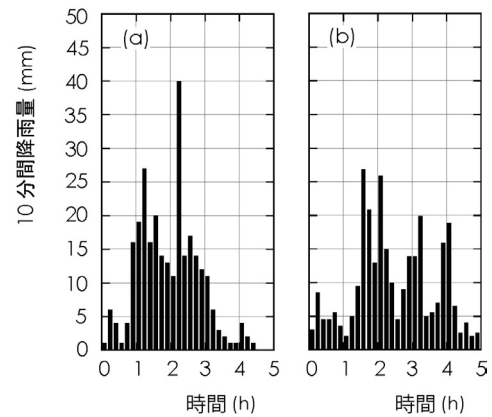


図-2 降雨ハイレートグラフ：(a)2005 年下井草  
で観測された豪雨，(b)2000 年名古屋で  
観測された東海豪雨 (50mm/h を大きく  
下回る前後の雨のデータを除いたもの)

適切に考慮された研究はなかったと理解している。しかし、東京などの大都市には、高密度に整備された下水道ネットワークがあり、ここに流れ込んだ水は設計された方向に流れるようになっているほか、その排水能力も管によって異なる。地上に凹凸があるように、下水道の排水能力も流域内で様ではないのである。豪雨時に都市で発生する浸水・氾濫を予測するには、下水道を含めた実在する都市インフラや土地利用状況などをすべて反映させ、現実的に即して行われるべきである。このような考えに基づき、著者らは、「街路ネットワーク浸水・氾濫予測手法<sup>1)</sup>」と名づけた手法を考案し、これをさらに一般化あるいは高度化することに努めてきた<sup>2)</sup>。この手法の特徴は、必要となるインフラの情報をすべて入力し現実に即した計算を行っていることに加えて、街区と道路、道路と下水道、下水道と河川の間の水のやりとりについても力学法則に基づいて的確に解いている点にある。たとえば河川の水位が上昇すると下水道から河川への流出する水量に影響が現れ、水圧の大小によっては河川から下水道に向かって逆流が発生することになるが、こうした現象についても適切に解くことができる<sup>2)</sup>。本研究では、この手法を用いて神田川流域全域の浸水・氾濫予測計算を行い、どの地点にどの程度の浸水が発生するかという「浸水危険度」に関する知見を提示するとともに、下水道と都市河川との水のやりとり、特に河川から下水道への逆流によって、地上の浸水にどのような影響が現れるかに注目し、その検討結果について説明する。

参考までに、この手法の妥当性の検証については、2005 年に妙正寺川で発生した浸水・氾濫事例の再現計算<sup>1)</sup>や、2008 年に雑司ヶ谷で発生した水難事故の再現計算<sup>1)</sup>などを通じて可能な限り行われており、その後の論文を通じてすでに報告してきている。

本研究に関連する既往の研究として、名古屋市堀川流域を対象にした研究<sup>3)</sup>や、福岡県の遠賀川流域を対象

にした研究<sup>4)</sup>などが重要である。

## 2. 解析の概要

### (1) 対象区域の特徴

図-1には本論文で説明する対象区域内のすべての道路面の標高コンター図が示されている。この区域内には東京都下水道局の落合処理区のすべてと新河岸処理区の一部が含まれており、境界をまたぐような地上ならびに下水道内の水の流れが生じないようになっている。神田川の支川である善福寺川・妙正寺川・江古田川の流域もすべて網羅されている。なお、神田川に関しては、図-1に示された対象区域の右上端付近ですべての支川の合流が完了して一本の川となり、都心部をさらに東に向かって流れ下り隅田川へと至る。本解析では、図-1の東側に広がる流域をも含めた解析をしているが、豪雨に関しては図-1の区域にのみで発生するとした。この区域の流域面積は約 70km<sup>2</sup>であり、東側に広がる下流域を加えた全流域面積の 70%に相当する。なお、この区域の土地利用状況としては、南東端付近にあたる新宿副都心や中野駅前など一部に高層ビルが林立するエリアはあるものの、それ以外はほとんど一般的な住宅密集地である。

この区域の雨水排除システムとして特筆すべき点は、1. でふれたとおり、環七地下調節池のほか合計 9 つの調節池が整備されていることや、和田弥生幹線下水道などの地下貯留施設も整備されていることなど、浸水被害を軽減するための高度な仕組みができあがっていることである。本解析では、これら施設に関わる詳細な情報をすべて反映させ、それぞれの機能が現実的に即して発揮されるように留意して浸水予測計算が行われている。

### (2) 対象降雨

対象降雨としては、2005 年 9 月に対象区域内の杉並

区下井草で観測された豪雨データを用い、これが対象区域全域にわたって一様に降るものとした。図-2の左側に示されているのがその降雨ハイトグラフである。この雨は東京都23区内でこれまでに記録されている中で最大級のものであり、下水道の設計強度50mm/h以下の降雨時間帯を除くと、2000年に名古屋で観測された東海豪雨（同図の右側のハイトグラフ参照）と同等かそれ以上の豪雨とすることができる。今後さらに高強度の豪雨に遭遇することも考えられるが、現時点では、この豪雨に対して対象区域内にどのような浸水リスクが潜在するかを明らかにすることを目指した。

### (3) 解析手法

解析手法としては、1.で説明したように第一著者による予測手法を適用した。この手法は、「地上（道路と街区）—下水道—河川」における水の流れを現実的に即して一体的に取り扱うものであり、相互の間の水のやりとりについても現実的に即して的確に解いている。たとえば、道路と下水道をつなぐ雨水ますや、下水道と都市河川を結ぶ雨水吐、さらにはポンプ場・水再生センターを介した水の流出についても実データを踏まえて忠実に取り扱っており、できるだけ精緻な浸水予測となるようになっている。

このうち、雨水吐を介した水の流出入について簡単に説明を加えておく。下水道と河川とを結ぶ雨水吐は、都市河川の側壁上に配置されており、個々の位置ならびにその大きさなどの状況は、東京都より提供を受けたデータから判断できる。そこで、その個々の雨水吐に対して次のような計算を行った。すなわち、雨水吐につながる下水管の両端のピエゾ水頭のうち、上流側に位置するManhole点におけるものは通常の下水道内の計算により求められる。一方、下流側の点における値は、河川水位が十分低い平常時には大気に向かって流出するように考えればよいが、河川水位が上昇して雨水吐が水没するような状態になると、河川水位そのものに等しくなる。このため、下水道内の流れと同時並行で行われる河川水の流れの計算によって算定される時々刻々の河川水位の値を考慮することにより、雨水吐からの流出量を求めることになる。なお、上流側に位置するManhole点のピエゾ水頭よりも河川水位の方が大きくなると、河川から下水道への逆流が生じることになることは言うまでもない。なお、本解析では河川を20m間隔に分割し、それぞれの区間毎の流れを解いている。

### 3. 対象区域内の浸水危険度の評価

ここでは、対象区域内の浸水危険度に関する検討結果について説明する。浸水拡大プロセスについては以下のようになる。図-2(a)に示されているように降雨強度が下水道の設計値50mm/hを超えたわずか10分後に相当

する時刻（降雨開始60分後の時点）には、下水道の一部に満管状態になる地点が現れ始める。そして、降雨開始80分の時点でほぼ全域にわたって満管の状態となる。このため、この時刻以降は、下水道が効率的に雨水を排除できない状態となる。その結果として、地上の浸水域が拡大し、浸水深の値も増大していくことになる。そして地上の浸水の状況が最も深刻となるのは降雨開始140分の時点であった。この時刻は、降雨が2つ目のピークを迎えた直後に相当する。この図より、地点によっては浸水深が1mを上回るような地点が現れることが確認された。その後、降雨が弱まるにつれて下水道の疎通能力が回復していき、道路上の浸水域もゆっくりと改善していく。

図-3には、浸水が最も深刻な状態となる降雨開始140分の時点での道路上浸水深のコンター図が示されている。同図中には、この区域内を流れる神田川・善福寺川・妙正寺川・江古田川の流れの状態も併記されている。ここには、各地点における河川の水深を、その点での河床から側壁の天端までの鉛直距離（側岸の高さ）で除した無次元水深をとって表示されており、赤色になっている地点では河川から堤内地側へ越水が生じていることを意味する。本解析によれば、江古田川が妙正寺川と合流する地点付近などいくつかの地点で越水が生じるという結果になった。

### 4. 浸水発生のメカニズムに関する一考察

図-3に示された結果などを精査すると、比較的規模の大きな浸水が発生している地点は、概ね次のふたつに分けることができる。第一は、旧河道沿いの低地である。そのうちのひとつが、中野駅南東部に位置する旧桃園川沿いのエリアである。第二は、河川沿いのエリアであり、河川からの越水が生じていないにもかかわらず、0.8mを超える浸水が生じている地点である。これらの浸水がどのようなメカニズムで発生したのかを探るため、解析結果を踏まえて検討した結果を以下に説明する。

まず、第一のエリアについて説明する。前述した旧桃園川は50年ほど前に暗渠化され、現在では桃園川幹線下水道により置き換えられている。ただし、地形的には周辺よりも標高の低い低地である。検討結果をまとめたものが図-4である。図-4(a)は、桃園川幹線の真上にあたる注目地点周辺の浸水深コンター図の拡大図である。この図の背景は、地上の標高の大小によって異なる色で塗り分けられており、このうち緑色のエリアで標高が低いことを表している。この図より、旧桃園川沿いのエリアでは、管径が5mを超える桃園川幹線下水道が敷設されているにもかかわらず、浸水深が1mを超えることがわかる。図-4(b)にはこの地点周辺の下水道満管率コンター図を示した。この図中に赤色で示された箇所は下水管が満管状態になっていることを表す。図の中央を

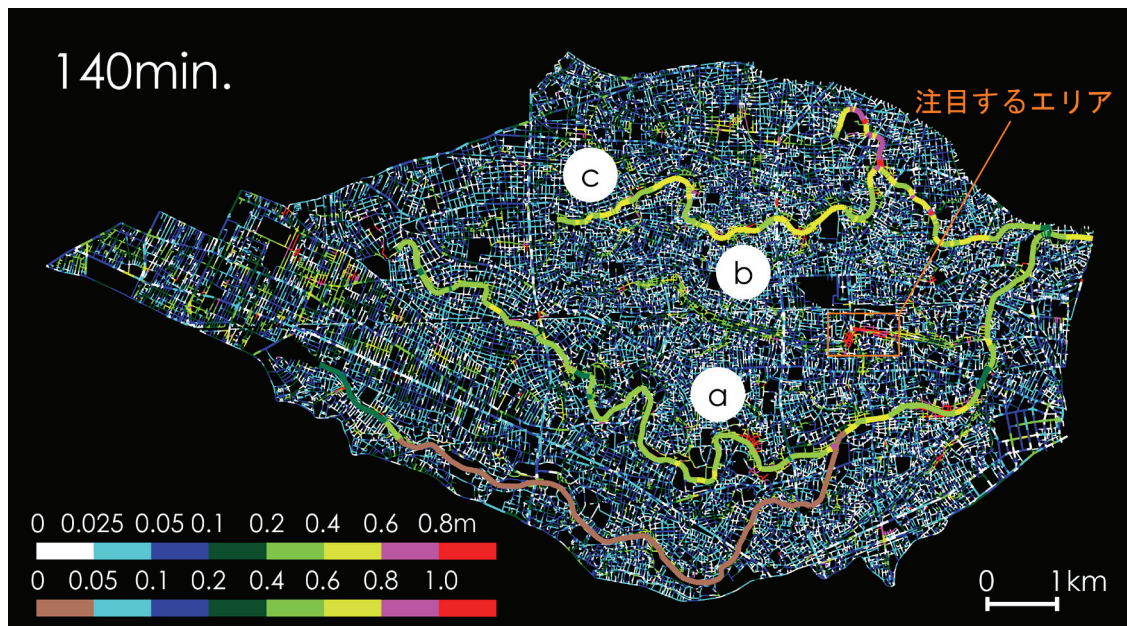


図-3 降雨開始 140 分後の浸水深コンター図：この時刻に対象区域内の浸水状況が最も深刻となる。図中の上段の凡例は道路上の各地点の浸水深に対応するものである。また、下段のものは河川の側岸高さ（河床から側壁天端までの鉛直距離）で除した各地点の無次元水深の値を表す。1 を超える場合に河川からの越水が生じることを意味する。

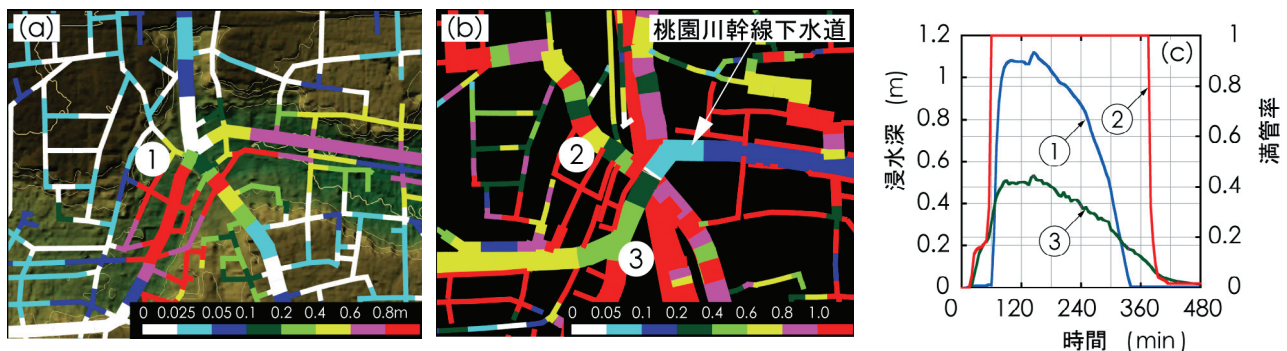


図-4 桃園川幹線下水道周辺のエリアの浸水状況について検討結果：(a) 桃園川幹線直上にあたる地点周辺の浸水深コンター図，(b) 下水道満管率コンター図，(c) 地点①（左側の図参照）における浸水深ハイドログラフと，下水管内の地点②③（中央の図参照）における満管率ハイドログラフを表す。

左から右に延びる太い管が桃園川幹線下水道である。この図より、この幹線下水道は満管状態にはなっておらず、十分な通水能力を維持している。ところが、これにつながる枝管路のほとんどすべてが広い範囲にわたって満管状態になっている。このことは、例えば図-4(c) に示したハイドログラフを見ると明確である。ここには、左側の図の地点①における浸水深ハイドログラフと、中央の図の地点②③における下水道満管率ハイドログラフが示されている。図の緑色の線で描かれているのが桃園川幹線下水道におけるものであり、最大でも下水管の容量の 45% 程度しか水が流れておらず、十分な通水能力が維持されている。これに対して、赤色の線で描かれている線が、この幹線下水道につながる枝管路内のある地点における値を表す。この図より、降雨開始 60 分の時点で満

管状態に達し、それ以降 300 分間にわたってこの状態が維持されており、地上の水がうまく排除できない状態であることがわかる。この状態は降雨が停止した後も継続される。以上のことから、十分な能力を持つ幹線下水道が整備されていても、それにつながる枝線下水道の疎通能力が大幅に低いような場合には、地上の水を効率よく排除することはできず、結果として大きな浸水が生じることになると判断される。注目地点はまさにこのような状況になっており、旧河川沿いの窪地地形であることも相まって、深刻な浸水となると推察される。なお、上記の枝管路の管径が 25cm と、かなり小さいことから、より大きな管路に代えることが浸水対策上有効であると考えられる。

次に、河川沿いに大きな浸水が生じるとされる地点に



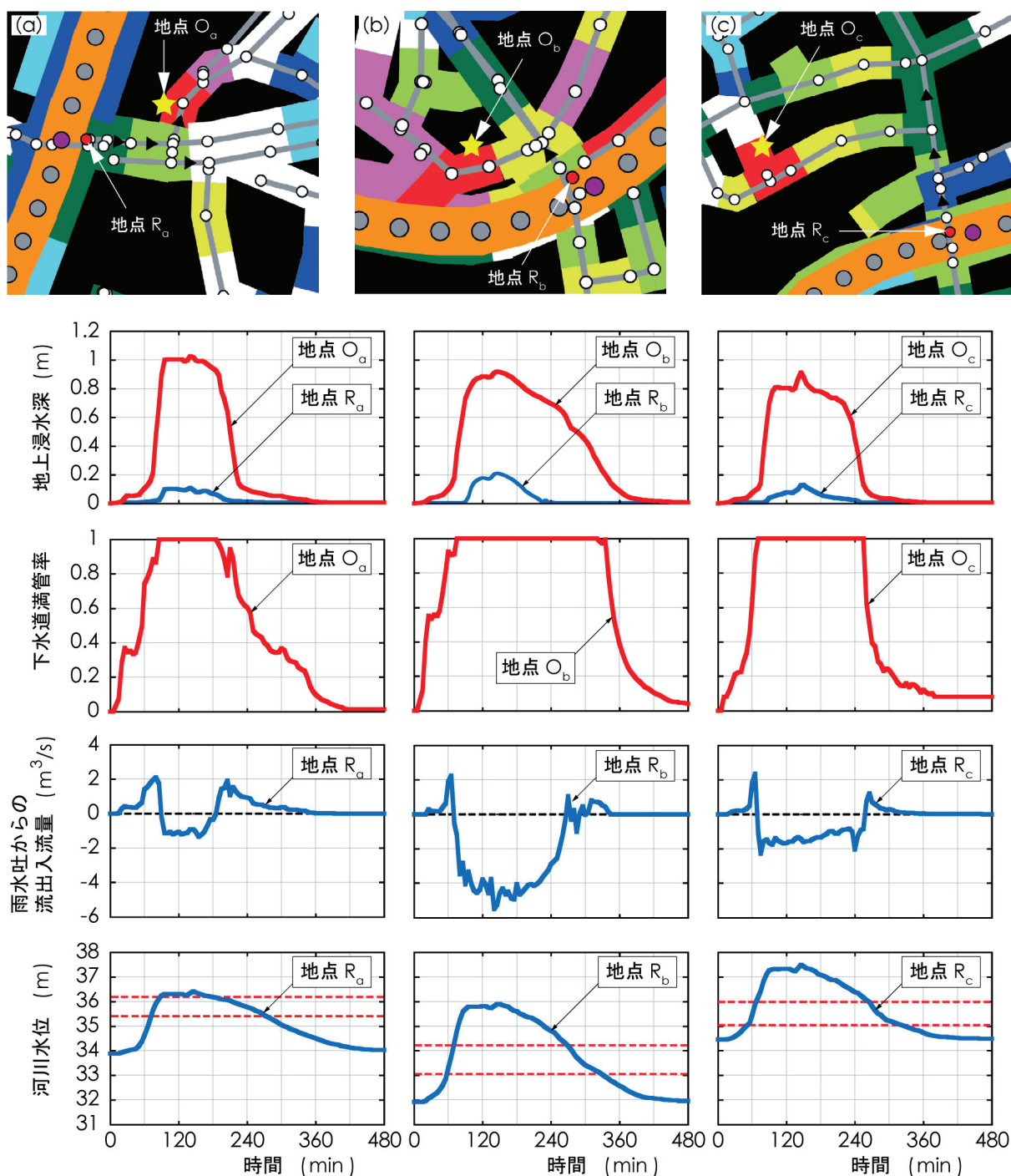


図-5 河川周辺で浸水が発生するメカニズムに関する検討結果：上から順に、地上浸水深コンター図ならびに地上浸水深（地点O、地点R）、下水道満管率（地点O）、雨水吐からの流出入流量（地点R）、河川水位（地点R）のハイドログラフを表す。なお、地点Oは☆印、地点Rは雨水吐地点、河川水位ハイドログラフ中の赤色の点線は管底と管天井の高さを表す。

についての検討結果について説明する。図-5には、善福寺川ならびに妙正寺川周辺で0.8mを超える浸水が発生した三地点に注目し、それぞれの地点でどのようこの規模の浸水に到るのかを検討した結果を表す。

まず、図-5の左側に示されているのが、善福寺川周辺の地点a(図-3参照)における結果である。最上段に示したのが地上浸水深コンター図の拡大図であり、図上に星(★)印で示した地点(地点O<sub>a</sub>)に注目する。この

地点O<sub>a</sub>ならびに雨水吐近傍の地上地点R<sub>a</sub>における浸水深ハイドログラフが二段目に示されている。さらに、三段目には地点O<sub>a</sub>近傍のManhole点における満管率の時間変化を示した。四段目には雨水吐を通じた水の流出入流量の時間変化を表している。この図における正の値は、下水道から河川に向かう流れを表し、これが負の値となる時間帯では河川から下水道に向けて逆流が生じることを意味している。最後に最下段の図は、雨水吐が接

続されている地点における河川水位のハイドログラフである。この図より、図中の星印で示された地点  $O_a$  では、約 100 分間にわたって 1m ほどの浸水が続くことが見てとれる。このようなことになった理由については次のように説明することができる。地点  $O_a$  において浸水深が急増しピークの状態を維持している時間帯に注目すると、河川の水位が上昇し、雨水吐が水没するような状態になっていることがわかる。図-5 の最下段に示された赤色の点線は、その地点に接続する雨水吐の「管底」ならびに「管天井」の高さを表している。結果として、三段目の図よりわかるように、同じ時間帯に河川の水が下水道に流れ込んでいることが確認できる。これに伴って、雨水吐地点  $R_a$  と地点  $O_a$  付近とを結ぶ下水道はすべて満管の状態となっている。この状態では、地上の水が下水道に取り込まれないばかりか、下水道から雨水ますを通じての逆流が生じていることも確認されている。地点  $O_a$  周辺で長時間にわたって比較的大きな浸水が生じるとされた最大の要因は、このような河川からの水の逆流であると考えられる。

図-5 の中央ならびに右側には、妙正寺川周辺の地点 b ならびに c における同様の検討結果を示した。星印で示された各地点における浸水深は、最大でそれぞれ 0.92m, 0.91m となった。このような浸水が生じたメカニズムは前述のものとはほぼ同様と判断される。ただし、先の例と異なり、河川水の逆流はこれらの浸水地点近傍の下水道までは及んでいない。ところが、注目地点の標高が周辺に比べて低い窪地になっており、河川から下水道内を遡って途中まで運ばれてきて地上に逆流した水が、さらに道路上を流れ下ってこの地点に集められたと判断される。

その他の比較的大きな浸水が発生すると判断された地点を調べると、河川からの逆流が原因でない地点もある。これらの地点では、降雨が弱まるにつれて下水道満管率が低下していき、地上の浸水域も減少する。これに対して、河川からの逆流が原因で浸水が発生した地点では、雨水吐からの河川水の逆流が生じなくなる時刻までは、下水道満管率・地上浸水深ともにピークの値をとり続ける傾向にある。すなわち、前述した浸水地点と比較して、

浸水が長期化する傾向にあると言える。

## 5. 結論

本研究では、神田川流域を対象に浸水予測計算を行い、区域内の浸水危険度評価を行った。これにより、区域内のどの地点で浸水リスクが高いかを明らかにすることができた。また、「地上・下水道・河川」を一体的に取り扱うことにより、河川から下水道内への逆流現象に注目した検討を行い、これが地上の浸水に密接に関わるメカニズムについて説明した。

本研究により、豪雨により発生する都市の浸水予測として、本手法が有用であることを示すことができたと考えられる。

**謝辞：**本研究の遂行に当たり、東京都建設局河川部ならびに下水道局からデータの提供を受けるなどご協力をいただきました。また、研究の途上に有益な意見交換をさせていただきました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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.2，70-85，2011。
- 2) 関根正人，浅井晃一：神田川流域を対象とした豪雨による浸水・氾濫に関する数値予測，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71，No.4，pp.I\_1429 - I\_1434，2015。
- 3) 武田誠，高橋俊彦，長尾佳幸，平山康典，松尾直規：都市域の内水氾濫モデルの検討と浸水時対策への応用について，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.68，No.4，pp.I\_1015 - I\_1020，2012。
- 4) 秋山壽一郎，重枝未玲，野村心平：数値シミュレーションに基づく短時間豪雨に対する遠賀川流域の洪水と飯塚市街地の浸水特性の検討，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.69，No.4，pp.I\_1579 - I\_1584，2013。

(2015. 4. 3受付)