

東京で発生する大規模浸水・都市河川洪水と そのリアルタイム予測

関根正人（早稲田大学 理工学術院）

1. はじめに

近年、地球規模で進む気候変動の影響が顕著に現れてきており、毎年のように極端な気象に苦しめられている。日本近海では海水温が高い状態が維持され、多量の水蒸気が供給されることから、線状降水帯が形成され上空に居座り続けることなどして深刻な豪雨被害が発生している。たとえば、2015年に鬼怒川の堤防が決壊するというきわめて衝撃的な事象が発生し、これに伴い大規模な浸水が生じた。その後、2017年には九州北部豪雨により、流木被害を含む深刻な土砂災害を引き起こされ、2018年には西日本豪雨が発生し、広範囲で甚大な被害が生じることとなった。今後は、これまでに経験したことのない巨大台風が日本近海で発生し、十分な備えが整わないうちに東京を始め三大都市圏を直撃するといった事態も起こりうると思われるであろう。こうした状況下で、国土交通省は2016年に水防法を改正し、想定しうる最大規模の洪水や内水氾濫・高潮被害に備えることになった。ところが、「想定しうる最大規模の被害」とはいったいどの程度のものなのか、その時どのような事態にまで至るのか、ということをも具体的にイメージすることも容易でない住民が多いようである。

本講義では、東京が豪雨に襲われたときに発生する「都市浸水」と神田川などの都市河川の「洪水」に関わる研究の最前線と、その予測手法について紹介する。

東京をはじめとした大都市は、人が創り出した作り上げた空間であるため、そこで発生する「都市浸水」や「都市河川洪水」は、力学的な原理に基づいて解くことができる現象であり、雨の降り方を除けば数値的に解くことのできる問題になってきた。ただし、これにはすでに整備されてきた都市インフラの情報を忠実に反映する必要がある。また、気候変動下では、将来のリスクを予測するのに従来のデータに基づきパラメータをチューニングしなければならぬような簡易なモデルでは十分に信頼に値する予測にはならない。著者が開発した予測手法 S-uiPS (Sekine's urban inundation Prediction System) は世

界で唯一のものである。また、その精度検証についても行われてきており、今後の豪雨対策にとって信頼性の高い科学的根拠となりうる。

2020年に開催される東京オリンピック・パラリンピックまで残り2年となった。雨季の真最中での開催であるため、暑さに加えて可能な限りの豪雨対策を進める必要がある。こうした観点から、S-uiPSによるリアルタイム浸水予測(あるいは予報)を可能とする技術を開発し、これを社会実装する取り組みを進め、現在その最終段階にある。本講義ではこの点についても紹介する。

2. 都市浸水予測手法とは

2.1 都市構造の特徴

東京都23区のような「高度に都市化したエリア」には、道路がネットワークを形成し、これが縦横に延びている。その表面はアスファルトで舗装されているため、豪雨時の雨水の地中への浸透の影響は無視しうる程度にすぎない。設計降雨強度の50mm/h以下の雨であれば、この雨水のほとんどは下水道に取り込まれ、地上が浸水することはない。ところが、近年被害を引き起こしている豪雨は、この強度を遥かに上回り、100mm/hを超える雨もまれではなくなっている。自動車の快適な走行を可能とするため道路は直線化され、路面抵抗(あるいは粗度係数)も無舗装の場合に比べてかなり小さくなっていることが災いする。すなわち、氾濫水もまた高速で流下することができ、短時間のうちに浸水域が拡大していくことになる。

また、道路によって取り囲まれたエリアを「街区」と呼ぶことにすると、ここには建ぺい率・容積率などに関わる規則に従って建物が密集している。街区に降った雨水は、建物の上に降った雨と、庭や駐車場などの建物以外の部分に降ったものとで異なる経路をたどる。建物の上に降った雨水は、ビルの屋上や住宅の屋根から管路を經由して、建物が面する道路下の下水道へと運ばれ、他へ流れ出るあるいは漏れ出ることはない。このため、ある時刻に降った雨

はその後 5～数十分の時間遅れをもってそのまま下水道へ流出する。一方、建物以外に降った雨は水位差に応じて街区内を流動し、互いに境を接する道路との間で流出入を起こす。

一方、東京都 23 区などの都市域には、街から白井を運び去る仕組みができあがっている。これを「雨水排除システム」と呼ぶ。これは下水道ならびに関連施設と、都市河川とからなる。前者は、下水道のネットワークに加えてポンプ所・水再生センターなどを含む。後者は、神田川に代表される河川と、その水を一時貯留する目的でつくられた環七地下調節池などの施設からなる。これらの設計時に設定された雨の強さが前出の 50mm/h.、すなわち 1 時間当たり 50mm の雨である。道路上の雨水を下水道内に運び入れる仕組みとしての「雨水ます」がある。道路上の雨水は、この「雨水ます」にまず集められ、ここから下水道に流れ込む。なお、下水道内の水が地上に流れ出して被害を拡大することになるが、これは雨水が上記とは逆に経路をたどって雨水ますからあふれ出るのである。マンホールから出るわけではないのである。

最後に、都市河川についてふれる。東京には、都県境を流れる江戸川・多摩川や、荒川・隅田川といった大河川が流れている。これら以外に、神田川・石神井川・渋谷川(古川)・目黒川など西から東に向かって流れており、これらを都市河川と呼ぶ。都市河川の兩岸は護岸壁で仕切られており、河床も含めてコンクリートで覆われている。この壁面には、「雨水吐」と呼ばれる下水管の出口が開けられており、下水道内を運ばれてきた水が都市河川内に流れ込むように設計されている。このように、地上から集められた雨水は下水道を経由して都市河川に運ばれ、最終的には東京湾へと流れ出すことになる。豪雨時に都市河川が洪水となるのは、このようにして短時間に大量の雨水が流れ込むためである。なお、洪水時には、下水道からの雨水の排出先である河川の水位が高いことから、設計どおりの水の流出ができなくなり、状況によっては河川から下水道への逆流さえ起こってしまう。これが都市の浸水をより深刻なものとする。このように、「都市の浸水」と「都市河川の洪水」とは連動して進行するひとつのイベントであり、別個の現象として生じるわけではない。

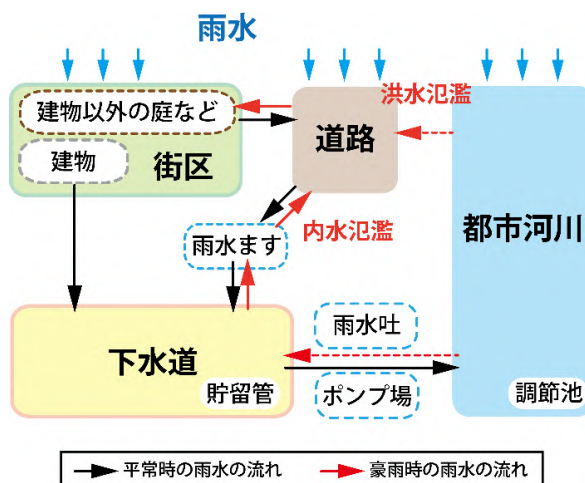


図 1 都市構造と浸水発生の概念図

2.2 都市浸水予測の概要

これまで説明してきた雨水の流れを模式的にまとめると、図 1 のようになる。都市は人間が設計し創り出してきた空間であり、地形や都市インフラに関わる詳細な情報はすべて我々の手元にある。不確定要因といえるものは限られており、道路の渋滞状況や、落ち葉などによる雨水ますや管路の詰まり、道路面や下水道壁面の劣化くらいである。肝心の降雨量の時空間的な変化についてはもちろん未知であるが、集中豪雨の予報に向けた研究も現在同時進行の形で着々と進められていると認識しており、その進展を待っているところである。

さて、図 1 の「道路 - 街区 - 下水道 - 都市河川」で生じる水の流れ、ならびにその相互の間の水の流出入については、それぞれ流体力学あるいは水理学の原理に基づいて数値的に解くことができる。その際の基礎式となるのは運動方程式と連続式である。この基礎式を数値的に解く際には、図 1 に記されたすべての都市インフラに関わる膨大な詳細データが必要となる。このため、計算コードの開発とあわせて、効率的な計算を可能とするデータベースの作成を進めてきた。このデータベースには、幅数 m ほどの路地を含む実在するすべての道路と、各家庭から延びている管径 250mm の枝管路から 5m を超える幹線下水道までのすべての下水道が考慮されている。また、道路点の標高についてはレーザ・プロファイラによる 1m メッシュの測量データが用いられており、街区の土地利用状況については公表されている建ぺい率・容積率のデータを基に現実に即して忠実に取り扱っている。

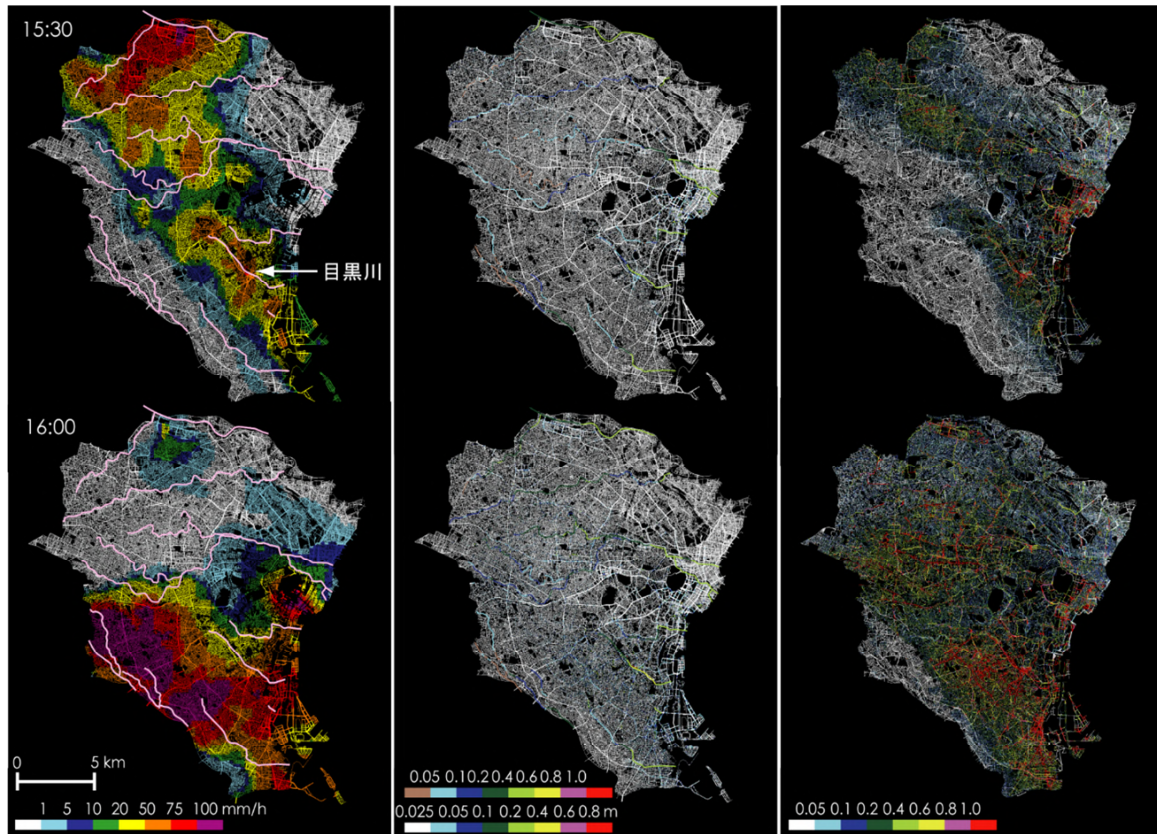


図 2 2013 年 7 月 23 日豪雨時に発生した都市浸水の再現計算結果(上段が15:30, 下段が16:00): 左側がXRAIN による降雨強度のコンター図, 中央が道路浸水深のコンター図, 右側が下水道満管率のコンター図を表す. 中央の図の凡例は, 上段が水深を河床から護岸天端までの高さで除した無次元量に対応するものであり, 下段が浸水深を表す.

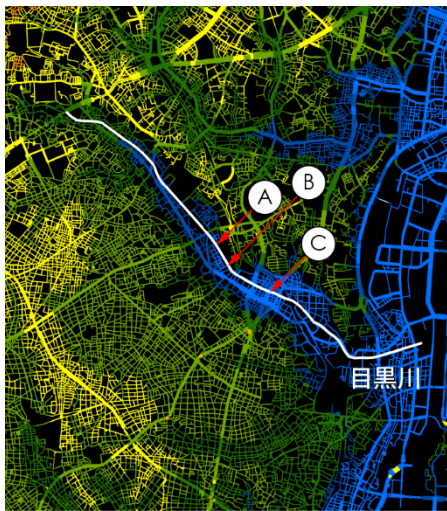
予測計算手法の詳細については紙面の制約から説明を省略するが, 本予測手法 S-uiPS は, 実在の都市で発生する浸水イベントを可能な限り精緻に計算することができるようにつくられている. 重要な点は, あくまでも力学法則のみに基づいており, 仮定・仮説の類いや数字合わせのための補正係数などは一切導入されていないことである. 市販されている汎用コードに共通する問題点として, 事前のキャリブレーションを必要とするようなパラメータや補正係数が多数持ち込まれ, 何を前提としているのかわからないようにブラック・ボックス化されている. 本手法はこの点で大きく異なり, モデル化のためのパラメータがひとつも含まれておらず, 現在の東京で確認されているものと同等の予測精度が, 将来の他の都市に対しても期待することができるのである.

3. 内水氾濫による都市浸水

この章では, 「隅田川の西側に位置する多摩川まで

のエリア」を対象とした検討の結果について説明する(関根・中森・児玉・斎藤, 2017). このエリアの総面積は 390 km² であり, 東京都 23 区のうち 18 区がこの中にある. また, 6 つの下水道処理区に分けて雨水処理が行われている. このエリアは, 日本の首都機能を担う政治ならびに経済の中心といえることができる. ここで紹介するのは, このエリアを襲った 2013 年 7 月 23 日の集中豪雨時の再現計算の結果である. 豪雨は 13:40 ~ 17:15 にわたって, 主としてこのエリアの南西部に当たる目黒区・世田谷区で発生しており, 16:30 までの 60 分間に限れば 100mm を超える猛烈な雨が観測された. 当時は, 東京都では 3 年ぶりとなる「記録的短時間大雨情報」が同時刻に出されている. また, このエリア内を流れる目黒川では, 氾濫危険水位に達するほどの洪水となり, 水位の急激な上昇が計測されている. この再現計算には, 国土交通省の X-RAIN による降雨データを入力値として用いた. これは, 約 250m 四方の空間解像度をもち 1 分間隔に更新されるデータで

ある．



路上の浸水の範囲は雨雲の動きに伴い変化していく

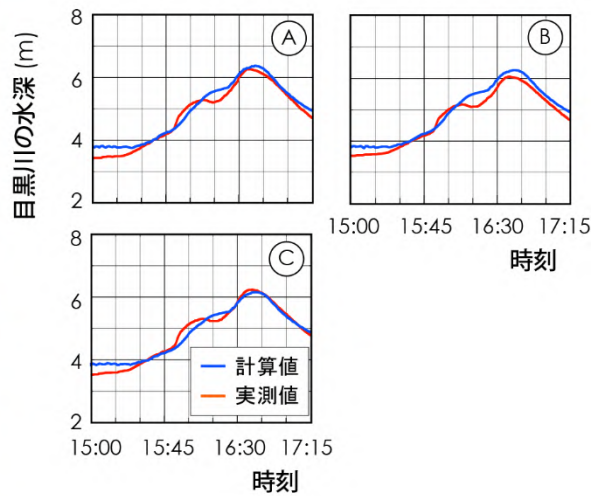


図 3 豪雨中の目黒川の水位変動に関する予測精度検証：左側の図は目黒川流域内の道路標高コンター図上に目黒川の位置を記したものであり，黄・黄緑・緑・青の順に標高が低いことを表す．

計算の結果の一例を図 2 にまとめて示す．左側の図中にピンク色の実線で描かれているのがここを流れる都市河川であり，神田川・渋谷川（古川）・目黒川などがこれに当たる．なお，図の右側に広がるのが東京湾である．この図 2 の左側に示されているのが当時の豪雨の状況であり，二つの時刻における降雨強度の大小に応じて異なる色で塗り分けられている．この図より，雨雲が北西から南東へ向かって移動し，オレンジ色・赤色・紫色で表された「下水道の設計降雨強度 50mm/h」を大きく上回る強い雨が組織的に降っていたことがわかる．

図 2 の中央の図は，各時刻における道路上の浸水深のコンター図であり，その値の大小に応じて下段の凡例のように異なる色で描き分けられている．たとえば，赤色の線分は 0.8m を超える浸水が発生するとされた道路を表す．なお，この図には街区内の浸水深は表示されていない．実際には街区内の浸水の状況も計算しているが，道路ネットワークの状況を可視化しやすくするためにあえてこのようにしている．さらに，同図中には，都市河川毎の水位の状況も合わせて示してある．ここでは，河川区間毎の水深を，河床から護岸天端までの高さで除した値を「相対水深」と定義し，この値に応じて異なる色の線分で描き分けることにした．この凡例が図中の上段のものである．

この中央の図中の浸水深コンター図を見ると，道

が，南西部に位置する目黒区・世田谷区において顕著な浸水が生じていたことがわかる．この結果をさらに詳細に調べたところ，たとえば目黒通り下を延びる山手通りのアンダーパスでは最大 0.51m の冠水となった．ほぼ同時刻に同じ場所を撮影した画像を解析したところ，その浸水深は 0.45～0.50m 程度であったと推定される．両者の誤差 5cm 程度である．これ以外の平地でも浸水が確認されているが，それらの地点でも同様の比較を行ったところ，いずれの地点でも誤差は 5cm 以下の範囲内にあることが確かめられた．同様の検証は，2014 年 6 月 29 日の豪雨でも試みており，上記の通りの誤差範囲に収まることが確認されている．このことから，本手法による道路浸水深の予測精度は極めて良好と判断することができる．

また，下水道の芝浦処理区と森ヶ崎処理区の境界を流れる目黒川の下流域では，15:30 過ぎから非常に激しい雨が降り始め，その周辺に降った雨水が下水道を経由して目黒川に流れ込んだ．そのため，河川水位はその直後からわずか 1 時間ほどで 2m 以上も上昇することになり，16:30 の時点で氾濫警戒情報が出されることになった．図 3 は，東京都により自動計測された目黒川三地点における水深の時間変化（すなわちハイドログラフ）と，再現計算の結果とを比較したものである．赤色の実線が実測値，青色の実線が計算値を表す．また，左側の図は，周辺

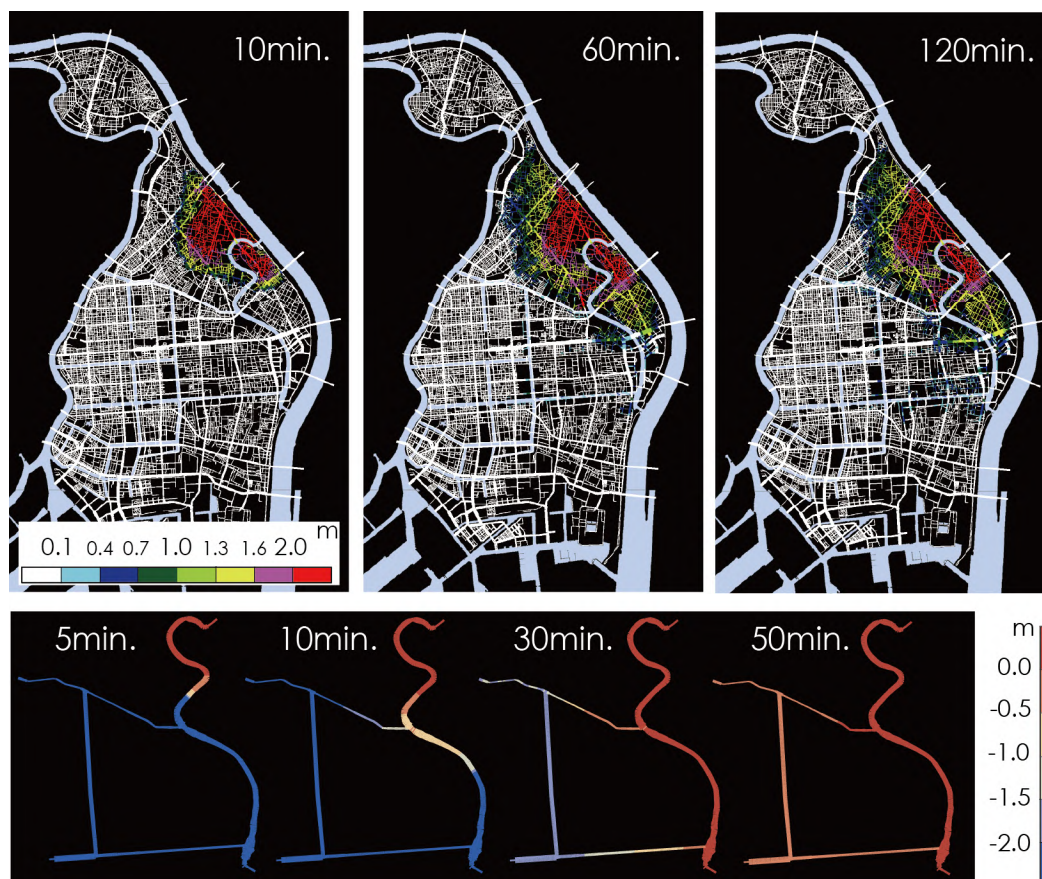


図 4 荒川堤防決壊時の大規模浸水プロセス：左上図中の緑色印が決壊地点，堤防決壊時を時間の原点とする．上段が各時刻での道路浸水深カウンター図，下段が東側内部河川内の水位の時空間変化．

エリアだけ拡大した道路標高カウンター図上に、目黒川の位置ならびに三地点の位置を併記したものである。目黒川の北東側が芝浦処理区、南西側が森ヶ崎処理区に当たる。この図より、三地点ともにハイドログラフのピーク値ならびにその発生時刻がとてよく一致していることがわかる。このことから、実際に発生した洪水についても、本手法により正確に予測できると判断される。

4. 荒川堤防決壊による大規模浸水

今後、東京で発生が懸念される浸水被害はほかにもある。そのひとつとして考えられるのが、荒川の堤防が決壊する事態になったときに発生する大規模浸水である。ここでは、隅田川と荒川に挟まれた「江東デルタ」でこのようなことが発生した場合を想定した計算結果を紹介する(関根・小林, 2017)。このエリアの総面積は 46 km² であり、その東半分には

東京湾平均海面(T.P. 0 m)を下回る低地が広がっている。このエリアは砂町下水道処理区と一致する。エリア内には「内部河川」と呼ばれる河川群が存在する。このうち東側に位置する旧中川・小名木川・北十間川・横十間川は、東側内部河川と呼ばれ、樋門と閘門によって西側内部河川と分断されているほか、荒川とは排水機場によって切り離されている。完全な閉鎖水域として管理されており、平常時は流れがなく、水位は A.P. -1.0m に維持されている。一方、豪雨時には、下水道に流れ込んだ雨水が 17 のポンプ所を通じてこの内部河川に排出されるように設計されており、この内部河川からは二つの排水機場を通じて荒川に排水されるようになっている。ただし、荒川で堤防が決壊するほどの洪水が発生している時には、この排水は不可能であり、この限りではない。設計時の想定をはるかに超える豪雨や堤防決壊が生じると、下水道と内部河川からなるこの雨水排除システムゆえにたいへん複雑な浸水プロセス

となるのである。

図 4 は、内閣府中央防災会議の検討に倣い、荒川が 200 年に一度の規模の洪水となり、堤防決壊に到るとした想定に基づいて行った数値計算の結果である。決壊想定地点については、堤防高さの縦断方向変化のデータを精査した上で別途定めている。ここでは、決壊地点の堤内地側の水位を 5.5m、堤防の決壊幅を約 400m とした。

まず、図 4 の上段は、堤防決壊から 10、60、120 分後の道路上浸水深のコンター図である。左下の凡例がこれに対応する。図中に赤色で描かれているエリアでは 2m 以上の浸水となり、広い範囲で 4m を超えることになる。この図の左側境界が隅田川、右側境界が荒川であり、下側は東京湾に面するエリアである。一方、図 4 の下段には 5、10、30、50 分後の東側内部河川内の相対水深の時空間変化を表している。右下の凡例がこれに対応しており、図中に赤色で描かれた河川区間では護岸高を超える水位になっている。すなわち、沿川の道路がこれより高くない限り、街に向かってあふれ出す状態にあることを意味する。

図 4 に示されるような堤防決壊が生じると、氾濫水はわずかな時間の後に内部河川に流れ込み、南西に位置する最遠点に向かって河川内を短時間で流れ下る。この水位が護岸高さまたは沿川の道路標高を越えるようになると内部河川から水が溢れ出し、浸水域はさらに拡大することになる。また、下水道内に流れ込んだ水は高圧力の流れを形成し、高速度で下水道ネットワーク内を流下する。そのため、地上の氾濫流のフロントよりもはるかに離れた地点において、3. で取り扱った内水氾濫と同様のメカニズムにより浸水が発生することがわかった。このようにこのエリアで生じる大規模浸水のプロセスは単調ではなくとても複雑なものとなる。

5. おわりに

東京のような極めて高度に都市化されたエリアで発生する浸水域の拡大プロセスは極めて複雑であり、整備されている都市インフラの影響を受けてとても複雑な現象となる。ただし、著者が開発した予測手法 S-uiPS によれば、こうした現象であってもかなりの精度でこれを予測することができる。東京都 23 区内には地下鉄のネットワークが縦横に延びている

ほか、大規模な地下空間が数多く存在する。これらの空間と道路アンダーパスとが大都市の浸水上の弱点である。実在する地下空間で発生する浸水のプロセスや、地下鉄トンネル内で生じる氾濫水の伝搬プロセスについてもひととりの検討を終えたところである。現在は、東京都 23 区の豪雨時リアルタイム浸水予測システムの構築の最終段階にあり、これを社会実装することにより、浸水の予測情報を広く活用できるようにしていく。

参考文献

- 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 (2011), 70-85 .
- 関根正人・和田祐樹・佐藤裕隆:住宅密集地を対象とした集中豪雨時の浸水氾濫過程に関する数値解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4 (2012), I_997-I_1002 .
- 関根正人・中森奈波・児玉香織・齋藤涼太:森ヶ崎下水道処理区を対象とした 2017 年 7 月 23 日豪雨時の都市浸水の再現計算とその精度検証, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4 (2017), I_1459-I_1464.
- 関根正人・小林香野:荒川決壊を想定した東京東部低平地の大規模浸水と避難に関わるリスクの評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4 (2017), I_1453-I_1458.
- 「大規模水害対策に関する専門調査会報告」2010 年 4 月, 中央防災会議, 大規模水害対策に関する専門調査会 .