森ヶ崎処理区を対象とした 2013 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

関根正人¹・中森奈波²・児玉香織²・斎藤涼太²

¹ 正会員 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)

E-mail: sekine@waseda.jp

² 学生会員 早稲田大学大学院学生 創造理工学研究科建設工学専攻 (同上)

近年の気候変動の影響により、東京都の雨水排除システムの設計強度をはるかに超える規模の集中豪雨が頻発している。本研究では東京都 23 区南西部を対象とし、国土交通省の X バンド MP レーダ (XRAIN) によって観測された 2013 年 7 月 23 日の実降雨データを用いて浸水状況の再現計算を行った。これにより、この豪雨による浸水がどのように発生・拡大していくかを明らかにした。さらに、当時の画像を解析して得られた実績浸水深や河川水位の実測値と同時刻における計算結果を比較した。区域内の道路冠水ならびに河川水位はほぼ実際と一致し、予測計算手法の妥当性と精度が示されたと考える。これは、詳細な浸水の様子が確認しにくいアンダーパス部などで有益な情報を提示する助けとなると期待する。

Key Words: torrential rain, XRAIN, urban inundation, urban river, numerical prediction

1. 序論

本研究で対象とする東京都 23 区内には、時間雨量 50 mm を設計降雨強度とした下水道と都市河川からなる雨水排除システムが整備されている。ところが、近年、設計強度をはるかに上回る豪雨が頻発しており、深刻な内水氾濫の発生が懸念されている。最近では 2016 年の台風 9 号に伴う豪雨によって都内各地で浸水被害が発生した。内水氾濫対策は、ハードウェアとソフトウェアの両面から進められているが、ハードウェアの強化にはコストと時間がかかるため、すぐに効果が出ると期待するのは難しい。これに対して、各自治体はソフトウェア対策としてハザードマップを作成・公開し、浸水のリスクを周知することに努めているが、これによりある程度の効果は見込められると思われる。ところが、各地点の最大浸水深のみを示した図であり、住民にとってわかりやすい情報とは言えないことや、その精度が不確かであるのも事実であり、十分とは言えない。今後の浸水被害軽減のためには、このプロセスに関わる精緻で信頼性の高い予測と、これにより得られる高精度の情報が求められている。また、これを住民の避難に活かすことが望まれる。

地上に降った雨水は、原則として標高の低い地点に向かって流れるか、または雨水ますを介して下水道内に流れ込む。また、建物の屋根に降った雨水は直近の下水道に運ばれる。そして、下水道に集められた雨水は、雨水

吐やポンプ所・水再生センターを介して都市河川に排出される。豪雨時には河川から道路ならびに下水道、下水道から道路への逆流も起こる。このような雨水の流れは、関根による予測計算手法¹⁾により、実在する都市インフラの情報を反映した形で忠実に再現可能になっている。

本研究では東京都 23 区の南西部に位置するエリアを対象とする。これは東京都下水道局が定める森ヶ崎処理区と一致し、ここには 7 本の都市河川が流れている。これは主として世田谷区・目黒区・品川区・大田区からなるエリアであり、23 区内で面積・人口・世帯数ともに上位を占める典型的な住宅地域ということもできる。また、東京と神奈川を結ぶ幹線道路をはじめ、23 区内を結ぶ環状道路が複数伸びている。

本研究は、現在進めている「リアルタイム浸水予報」に向けた取り組みの第一段階として行われたものであり、高い時空間分解能を有する実降雨データを入力値とした浸水予測計算を行い、その計算精度を検証することも目的とする。著者らは、すでに神田川流域²⁾や渋谷駅を含む東京都都心部³⁾で発生した浸水の再現計算を行い、その妥当性と予測精度の高さを確認している。本研究では、新たに国土交通省の X バンド MP レーダ (XRAIN) により観測された 2013 年 7 月 23 日豪雨のデータを入力値とした。これは典型的な局地的集中豪雨であり、時間雨量 50 mm 以上の強い雨が場所を移動させながら集中的に降った。当時、東京都 23 区内の多くの地

図-1 地上標高コンター図と浸水ときに撮影された画像データ：(a) 地上標高コンター図，(b) (c) 2013年7月23日の16:40に撮影された世田谷区の浸水状況を表す画像（株式会社ウェザーニューズより提供）。

点で道路冠水が報告されており，撮影された画像が数多く残されている．本研究では，可能な限り信頼に値する画像情報を集め，この画像から判読した浸水深と計算結果とを比較することにより，予測計算手法の妥当性の確認と精度検証を行った．さらに，対象区域を流れる都市河川の水位の観測値と計算結果との比較も行っている．

本研究に関連する既往研究としては，遠賀川流域を対象として都市域浸水・減災対策検討シミュレーションを行った秋山ら⁴⁾の研究や愛知県春日井市を対象とした内水氾濫解析を行った武田ら⁵⁾の研究がある．著者らのものとは異なる計算手法により当時の浸水の状況が的確に再現されており，現象の理解も深められた．

2. 解析の概要

(1) 対象区域の特徴

本研究では森ヶ崎下水道処理区を対象区域としており，図-1にはこの区域内の道路をその標高に応じて異なる色で描き分けた標高コンター図を示した．図の左下に距離表と凡例が示されている．この区域は，東京湾に面する南東部に向かって標高が低くなっており，赤色で示す標高50m以上のエリアから水色で示される0m以下のエリアまで存在し，北西から南東に向けて標高が大きく変化する．対象区域は，大田区全域，品川区・目黒区・世田谷区の大部分，杉並区の一部からなり，地表面の総面積は東京都23区全域の4分の1に当たる約145km²である．また，この区域の南東端には，東西2つの施設からなる我が国最大の「森ヶ崎水再生センター」が

位置する．対象区域の境界は，北側が玉川上水から甲州街道・駒沢通りならびに目黒川沿いに設定されており，東側は東京湾，南側は多摩川沿い，西側は三鷹市・調布市・狛江市との間の市区境にとられている．この地上の境界は下水道処理区の外縁とほぼ一致し，境界を越えるような水の流れはない．

対象区域内には目黒川や野川・仙川をはじめ7本の都市河川があり，下水道内の雨水の一部が雨水吐を通して流入している．図-1に白色の実線で描かれているのがこの区域内を流れる都市河川である．なお，上流域が対象領域外に位置する野川と仙川の取り扱いについては後述する．また，区域内東部の低地部には14箇所のポンプ所と1箇所の水再生センターがあり，下水道内に運び込まれた雨水はそれらの施設からポンプ排水されている．さらに，一時的に下水道の水を貯留する調整池が6箇所存在する．

対象区域には人口が集中する住宅地が広がる世田谷区・大田区が含まれており，道路冠水が懸念される箇所も多く，浸水時には大きな被害が懸念される．

(2) 対象降雨

本解析では国土交通省のXRAINによる実降雨データを用いた．これは，約250m四方の非常に細かいメッシュ毎に得られる降雨情報が1分毎に更新されるものであり，時空間分解能が高いため，より現実に近い浸水予測が可能となる．本研究では，2013年7月23日に観測された豪雨時の浸水事象を対象に，この豪雨データを入力値とした計算を行い，当時の浸水状況を再現することにした．この豪雨時の雨雲は北西から南東に移動

図-2 降雨強度コンター図の時間変化

図-3 地上浸水深コンター図と駒留陸橋付近の拡大図(16:30時点):左は地上浸水深コンター図,凡例の上段は地上の浸水深,下段は河川の相対水深.右上は標高コンター図上に地上の浸水深コンター図を重ねた拡大図.右下は下水道の満管率コンター図.

し、東京都23区内に多くの雨を降らせた。対象とする区域に限れば13:24～19:50に降雨があったが、このうち下水道の設計降雨強度である時間雨量50mmを超える雨が降ったのは14:26～16:52であった。さらに、時間雨量100mmを超える雨も降っており、15:35～16:29の約60分間にわたって途切れることなく観測されており、短時間に極めて強い雨を降らせた集中豪雨であった。計算には15:00～17:30の時間帯に降った雨を用いた。

この豪雨時には北端を流れる目黒川の一部で氾濫危険水位に達したほか、道路のアンダーパス部や標高の低い窪地などで冠水が確認されている。図-1の右側に示された写真は、世田谷区で16:40に撮影された画像であり、当時の浸水状況を推定できる画像と言える。本研究では、このような画像を可能な限り集め、判読した数値を検証用データとして用いることにした。

(3) 予測計算手法

計算には、第一著者による浸水予測手法¹⁾を用いた。この予測手法によれば東京都23区のような高度に都市化されたエリアにおける浸水の予測をかなり精度よく行うことができる^{1),2),3)}。計算に当たっては、「地上・下水道・都市河川」に関わる詳細なデータベースを作成した。その概要を簡単にまとめると以下ようになる。地上については、路地に到るまでの全ての道路ネットワークの情報と、建ぺい率や容積率に代表される街区の土地利用状況に関する情報からなり、下水道については、枝管路まで含めたすべてのネットワーク情報と、ポンプ所や調整池などの雨水を処理・排水する関連施設の情報からなる。さらに、「地上一下水道ー都市河川」の相互間の水の流出入を詳細に再現するため、道路と下水道をつなぐ雨水ます、下水道と都市河川をつなぐ雨水吐、さらには一部の雨水吐に設置されている河川からの逆流を防ぐフラップゲートも考慮されている。また、道路から河川への流

A:目黒通りと立体交差する山手通りのアンダーパス

B: 世田谷区弦巻 1-14

図-4 地点 A ならびに B の検討結果：①は浸水深コンター図の拡大図，②は降雨ハイトグラフ，③は浸水深ハイトロググラフ。

入や河川から道路への越水について忠実に再現した計算³⁾となっている。解析の初期条件や詳細な取り扱い方法については既に説明済み^{1),2),3)}であるため，そちらを参照されたい。なお，対象区域を流れる野川と仙川の上流端は西側に隣接する市に位置する。ここでは，その上流域には雨が降っていないものとして，平常時の流量を上流端から与えることにした。

3. 計算結果

(1) 計算結果

本章では，2013 年 7 月 23 日に発生した豪雨時の浸水プロセスの再現計算の結果について説明する。図-2 には当時の 16:00，16:15，16:30 における降雨強度のコンター図を示した。これは XRAIN により観測された各時刻の降雨強度の区域内分布であり，降雨の強さに応じて異なる色で描き分けられている。特にオレンジ色・赤色・紫色で示されているエリアでは，下水道の設計強度である時間雨量 50 mm 以上の雨が降っていたことになる。また，図-3 には 16:30 時点での地上の浸水深コンター図が示されている。この図には，河川の相対水深の縦断変化が色分けされて併記されている。ここに，河川の相対水深とは，河川の水深を，護岸高から河床高を引いた値で除した値を表す。そこで，赤色で示されてい

表-1 画像判読した浸水深の値と再現計算の結果：地上標高コンター図に示した地点 A から地点 E の画像判読より得た浸水深と同地点の計算結果

	地点名称	判読値(m)	予測値(m)
A	目黒通りと立体交差する山手通りのアンダーパス	0.4～0.5	0.51
B	世田谷区弦巻1-14	0.2～0.3	0.24
C	世田谷区用賀4-14	0.05～0.10	0.07
D	世田谷区用賀4-32	0.05～0.10	0.05
E	品川区西五反田1-11	0.2～0.3	0.22

る河川区間では河川から道路への越水が生じることを意味するが，この豪雨時には河川からの越水は生じなかった。これは実際の状況とも一致する。

時間の経過とともに雨雲が北西から南東に動いていくのに伴い，下水道内の流れも徐々に満管状態に達するようになる。一方，雨が設計強度以下の強さとなり，さらに降り止むと，下水道の排水能力は速やかに回復することが確認された。地上に発生した浸水域も雨雲の動きに応じて変化する。

ここでは，特に深刻な浸水が発生した世田谷区の駒留陸橋付近に注目した検討の結果について詳述する。図-3 の右上には，駒留陸橋付近の標高コンター図 (DEM データ) 上に，16:30 時点での地上浸水深コンター図を重ねたものを示した。標高は，オレンジ色など暖色系で塗られた場所が高いことを表す。この図より，浸水深が大きくなる地点は，北東から南西に向かって広がる窪地の中に位置していることがわかる。図-3 の右下には，同地点における下水道満管率コンター図を示した。上記の窪地に当たる場所で下水道が赤色で描かれており，満管状態になっていることがわかるほか，両者の図を比較することにより，地上の深刻な浸水が下水道への雨水集中と密接に関わっていることがわかる。なお，図中に示された蛇崩川幹線の一部では，計算上，下水道管内の水が逆流している箇所があることが確認されている。

本研究で対象とした豪雨時には，赤色で示される 0.8 m を超えるような深刻な浸水となる地点はかなり限定的であり，窪地やアンダーパス部に限って顕著な浸水となった。

(2) 内水氾濫の再現性

本研究では，豪雨時に撮影された画像を解析することにより，撮影された場所でのその時刻における浸水の状況を把握することに努めた。その一例が図-1 に示されている画像である。こうした画像と晴天時に撮影された画像を比較し，そこに写っている乗用車などの大きさを基にして，その地点の浸水深を判読することにした。集

図-5 目黒川の4地点における水深の時間変化の比較:左は標高コンター図上に目黒川を重ねた図であり、各地点の位置を示す。右は各観測所での河川水深の時間変化を表す。①田楽橋、②下目黒、③市場橋、④谷山橋。

められた画像は、窪地やアンダーパス部のものがほとんどであり、2013年7月23日豪雨時には、周辺より標高の低いこのような地点で深刻な浸水となったことがわかる。図-3の地上浸水深コンター図上に示したA～Eの地点は、画像が残されていた地点であり、以下に詳しく説明する。

まず、地点Aの目黒通りと立体交差する山手通りのアンダーパスについて述べる。図-4の上段には地点Aでの計算結果をまとめて示した。このようなアンダーパス部には豪雨時に雨水が急激に集中するため、排水ポンプなどが設置されているが、処理能力を超えた場合には雨水が一時的に溜まってしまう。そのため、豪雨時には注意しなければならない地点である。画像から推定された浸水深は0.4m～0.5m程度であった。なお、この推定値の幅は写真判読上入り込む誤差を見込んだものであり、写真の大きさにより異なる。一方、計算による同地点の浸水深ハイドログラフからは、16:40時点の浸水深が0.4mに達し、16:35過ぎには0.5m程度になったことがわかる。再現性はかなり高いと見ることができる。

また、地点Bの世田谷区弦巻1-14について調べると、図-4の下段の③のような結果が得られ、降雨のピーク直後の16:20の時点から浸水深が0.2mを超え始めている。画像からは同地点の浸水深が0.2m～0.3m程度であったと推定され、計算結果と一ほぼ致している。

紙面の関係で省略するほかないが、これ以外の地点C～Eの世田谷区用賀4丁目の2地点や品川区西五反田1-11でも同様の比較検討を行っており、その結果を数値のみ表-1にまとめて示した。いずれの地点においても画像判読から得られた浸水深と再現計算の結果はよく一致し、顕著な差が生じる地点は存在しなかった。これより予測計算の妥当性と信頼性の高さが確認された。

(3) 都市河川の再現性

都市河川は、隣接する道路や接続する雨水吐から流入する水を受け入れることにより、豪雨時に水位が急上昇する。本区域の北端を流れる目黒川には、2013年7月23日の16:30に、東京都と気象庁から氾濫警戒情報が出されている。本計算手法は、豪雨時の都市浸水と都市河川の洪水とをひとつの事象として同時に計算するものであることから、目黒川の当時の水位変化がどの程度再現できているかも調べている。目黒川では東京都建設局により河川の水位データが自動計測されており、その値と数値予測計算の結果とを比較検討した。

図-5の左側には、標高コンター図の拡大図上に目黒川の水位観測所の位置を示した。目黒川には合計10箇所の観測所があるが、河川湾曲部では内岸側と外岸側とで水位に差が出ることを考慮して、図中の4つの観測地点でのデータを比較に用いることにした。河川流については一次元非定常流計算となっている。図-5中の①が最上流の観測所、④が最下流の観測所であり、観測所①付近までの目黒川は森ヶ崎処理区内を流れるが、これより下流側では隣接する芝浦処理区との境界上を流れている。現時点での計算には、この芝浦処理区内に降った雨が下水道を通じて目黒川に流れ込む影響が考慮できていない。対象とした雨が主として森ヶ崎処理区内で降ったとはいえ、目黒川の水位あるいは水深が計算上過小評価となることは明らかであり、この点に留意して比較結果を見る必要がある。図-5の右側には各地点における「水深」のハイドログラフを示した。河川水位の実測値から求めた水深が赤色の○印で、数値計算の結果が青色の実線で描かれている。なお、実測値は東京都より提供された生データであり、値を精査したところ精度に明らかな誤りがある地点も認められている。このほか、現状の河床高と計算に用いた計画河床の値が食い違う地

点もあったことを念頭において、両者を比較するのがよい。さて、観測所①のハイドログラフを見ると、水深が上昇するプロセスやピークの値がほぼ一致しており、河川洪水の様子がよく捉えられていることがわかる。一方、観測所②～④のグラフに着目すると、全体的に実測値よりも計算結果の方が小さくなっており、前述した通り、芝浦処理区から流れ込む水が含まれていないことなどの影響と推察される。ただし、水深変化の傾向はよく一致していることから、芝浦処理区との一体計算、さらには東京都23区全体を対象とした一体計算を行うことにより、さらに高い精度の予測計算となるものと考えている。

4. 結論

本研究では、リアルタイム浸水予報に向けた取り組みの第一段階として、森ヶ崎処理区を対象にXバンドMPレーダで観測された2013年7月23日の実降雨データをもとに浸水状況の再現計算を行った。本論文では、当時撮影された画像から推定した浸水深と計算値とを比較・検討することにより、予測手法の精度を検証した。また、目黒川についても実測値と計算結果の比較を行った。その結果、本手法により都市浸水の拡大プロセスまでかなり精度よく予測できることを確認した。

これより、降雨の予測値を入力値とし、本手法を適用した計算を行うことにより、リアルタイム浸水予報を行うことは技術的に可能であると考ええる。ただし、現時点では計算時間に課題があり、市販のPCを使ってこの区域の計算を行うと、実時間相当の時間が必要になる。計算の高速化が今後の課題である。

また、今後は、このような予測計算の結果の有効な活用が望まれる。たとえば、豪雨時の避難や、アンダーパス部での通行止めの措置などを講じる際には有益な情報となる。また、豪雨時の都市河川の洪水について考える際にも、より詳細な情報が提供できるものと考えている。

最後に、本研究では、計算の妥当性の検証のため、画像データから浸水深を推定することを試みた。都市浸水に関しては、これまで状況を把握する情報がほとんど残されておらず、数値を得ることは極めて難しい状況にあった。ところが、携帯端末の普及に伴って多くの画像情報がとられている時代となり、これをいかに活用するかが重要である。十分に信頼のおける画像情報をどう効率的に集約し活用するかは、今後の重要な課題である。これについても引き続き取り組んでいく予定である。

謝辞：本研究の一部は（財）道路交通情報通信システム(VICS)センターとの共同研究の中で行われたものであり、XRAIN データはその一環として提供されました。河川ならびに下水道についての詳細な情報は、東京都建設局ならびに下水道局から提供いただきました。2013年7月23日の豪雨時の浸水状況に関わる画像情報は株式会社ウェザーニューズから提供いただきました。ここにあわせて記し、深甚の謝意を表します。

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・氾濫に関する数値解析，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.71，No.2，I_1429-I_1434，2015.
- 3) 関根正人，関根貴広：東京都都心部の地下空間への氾濫水の流入危険度とトンネル内の浸水域拡大過程に関する検討，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.72，No.4，I_1369-I_1374，2016.
- 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，I_1579-I_1584，2013.
- 5) 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，I_1375-I_1380，2016.

(2016. 9. 30 受付)

PREDICTION OF URBAN INUNDATION IN THE MORIGASAKI SEWAGE BASIN ON JULY 23, 2013 AND THE VALIDATION OF IT

Masato SEKINE, Nanami NAKAMORI, Kaori KODAMA, Ryota SAITO

Owing to the effects of recent climate change, it occurs frequently that torrential rains exceed design strength of the drainage system. The subject area of this research is southwest of 23 wards of Tokyo. And this research was conducted to simulate the urban inundation by using the actual rainfall data on July 23, 2013 observed by the X-band MP radar. As a result, it was revealed that generate and expansion process of inundation caused by this heavy rain. In addition, we compared the calculated result with the actual measurement value. Then, inundation depth and river water level in this area were consistent with the reality. In short, the validity and accuracy of the inundation prediction method has demonstrated.