

河川からの越水を伴う都市域の 内水・外水氾濫過程に関する数値解析

NUMERICAL ANALYSIS OF INUNDATION CAUSED BY A HEAVY RAINFALL
AND AN OVERFLOW FROM THE SHAKUJII-GAWA RIVER IN 2005

関根正人¹・中村 淳²・中村康朋³

Masato SEKINE¹, Jun NAKAMURA² and Yasutomo NAKAMURA³

¹ 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)

² 正会員 さいたま市 (〒 330-9588 埼玉県さいたま市浦和区常盤 6-4-4)

³ 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (〒 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

Recently, we often experience the heavy rainfall whose intensity exceeds beyond the designed magnitude, because of the influence of a heat island phenomenon in urban area as well as a global climate change. On September, 2005, such a heavy rainfall caused the flood damage in Tokyo Kita Ward due to an overflow from the Shakujii-gawa River. In this study, numerical analysis was conducted to investigate how this inundation occurred. As a result of this analysis, the inundation which caused only by the heavy rainfall also happened simultaneously, and therefore the damage became more serious than that only caused by an overflow water of the river.

Key words : *Inundation caused by overflow from river, drainage network system, heavy rainfall, numerical analysis.*

1. 序論

我が国では、人口と資産が過度に都市に集中する傾向があり、近年懸念されるようになった気候変動について考えるとき、必ずしも安全で安心な空間とは言えなくなってきた。都市が集中豪雨に見舞われたとき、道路は氾濫水を速やかに低地に運ぶ役目を担う結果となり、地下空間への浸水をはじめとした内水氾濫の被害が心配されている。こうしたことに鑑み、著者らはこれまで東京において内水氾濫が懸念される区域を対象として、現地踏査と数値解析とを柱とした研究を進めてきた^{1),2),3)}。ここで対象としてきた区域は、周辺に氾濫を起こす可能性のある河川がなく、外水氾濫を同時に引き起こす恐れはなかった。

これに対して、内水氾濫に引き続いて河川水が氾濫し、外水氾濫が併発する恐れのある区域も存在する。たとえば、東京都 23 区の西部区域では、2005 年 9 月 4 日夜から 5 日未明にかけて台風 14 号の接近に伴う集中豪雨に見舞われ、複数の河川が氾濫するなどして一部で深刻な浸水被害が発生した。その

降雨の規模は時間雨量 100mm を超えるものであり、これまでの想定をはるかに超えるものであった。たとえば、東京都北区では、この豪雨により石神井川の水が越流して堤内地に流入し、それまでに既に進行していた内水氾濫被害をさらに深刻なものとした。この河川の対象区間は、底面ならびに側岸がコンクリートでできており、洪水時にこの側岸の上部に設置されていた鋼製の仮設護岸が長さ約 33m にわたり損壊し、そのうちの 18.2m が側岸から落下することにより越水が生じることとなった。この区域は、以前にもたびたび内水氾濫の被害に遭っており、この豪雨の規模であれば河川からの越水がなかったとしてもある程度内水氾濫は生じたものと推察される。そこで、本研究では、実際に生じた氾濫現象を再現することとあわせて、もし外水氾濫が生じなかったとして豪雨のみによって発生したであろう内水氾濫の規模を推定することにした。これにより、この被害がどのように拡大していったかを探るとともに、河川からの氾濫水の影響によりどの程度被害が深刻なものとなったかを明らかにすることを目指す。

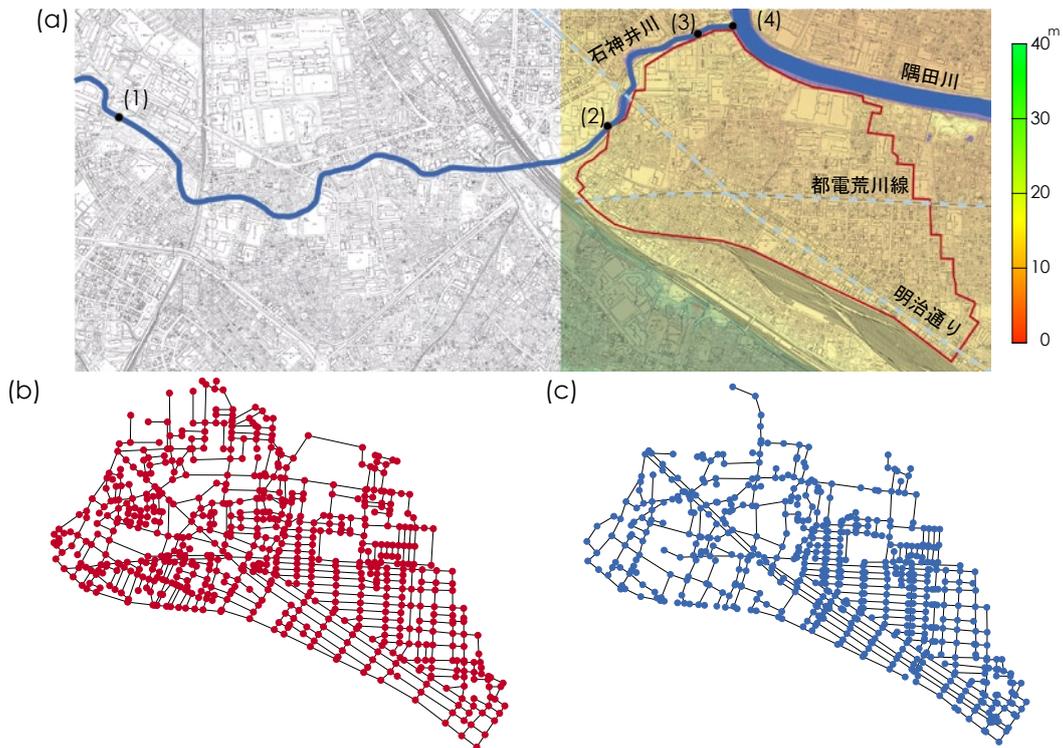


図-1 解析対象区域の概要：

(a) 解析範囲（赤の実線が境界、対象区域内の色は標高を表す。●印は(1)加賀橋（上流端境界）、(2)越水地点、(3)新柳橋（下流端境界）、(4)隅田川合流地点をそれぞれ表す）、(b) 道路ネットワーク、(c) 下水道ネットワーク

2. 解析概要

(1) 解析対象区域と降雨データ

本研究で解析の対象とするのは、図-1に示された東京都北区のJR王子駅北東側の実線で囲まれた区域であり、その面積は約3.2km²である。解析対象区域内には、西北から東南に貫くように明治通りという幹線道路が通っており、東西に都電荒川線が通っている。また、この区域の西北の境界に沿って石神井川が流れており、北側の境界に位置する隅田川に合流している。次に、解析範囲ならびのその周辺の地形については、図-1に色分けして示した地表高コンター図を見ればわかるように、明治通りの東北側に標高が低い区域があるものの、ほぼ平坦と考えてよい。この区域はこれまでも内水氾濫被害に遭っているが、2005年9月4日夜から5日未明にかけて台風14号の接近に伴う集中豪雨に見舞われ内水氾濫が発生したほか、4日22時25分に図-1(a)中の地点(2)において石神井川の仮設護岸が損壊し、外水氾濫の被害にも見舞われることとなった。

本研究では、この内水・外水複合氾濫過程に関する数値解析を行うこととし、降雨として図-2に示すような実績データを用いた。図を見るとわかるように局時的には100mm/hを超えており、想定規模50mm/hを上回る豪雨であった。図-2には、石神井

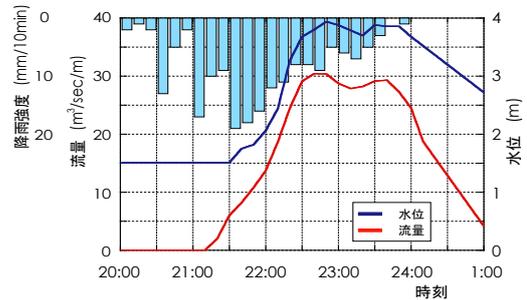


図-2 降雨量ならびに河川上・下流端における流量・水位の時系列データ（実績値）

川の上流端における流量データならびに下流端における水位データもあわせて示してある。本解析では、実績データのある図-1(a)中の地点(1)を上流端とし、同図中の地点(3)を下流端とすることにした。

(2) 数値解析モデル

数値解析の基本的な考え方は前報^{1),2),3)}で説明したものと同様である。道路上の水の流れの解析は、図-1(b)に示した道路ネットワークを対象に行っている。図-1(b)中の実線は実際の道路ネットワークを描いたものであり、赤丸が解析の際に計算点となる交差点を表す。道路上の流れの解析は、交差点を中心とした道路面のうち、これと隣接する交差点との間の中点を通る線分で区切られたコントロールボ

リュームに対して行うものとした。具体的には、交差点における水深と、コントロールボリュームの境界線となっている道路断面を通過する流れの流速をそれぞれ計算している。各交差点間の距離や道路幅については国土地理院発行の縮尺 1/2500 地形図より読み取った値を用いている。また、下水道網の中の流れに関する解析は、図-1(c)に示した下水道ネットワークを対象に行った。図中の実線は下水管路を示しており、青丸が計算点となる管路の接合点を表している。この解析においても、道路上の流れと同様の考え方でコントロールボリュームをとることとした。管路の長さ、管径などの下水道網の詳細に関しては、下水道台帳より読み取った値を用いた。さらに、道路面と下水道との間の水のやりとりについては、両者の間に存在する雨水ますを介して処理するものとして解析を行っている。本研究で対象とする区域に関しては高層ビル群こそ少ないものの、中小規模のビルや家屋が密集しており、水が通り抜けるあるいは滞留するような空地はほとんど見られない。外水氾濫を取り扱う場合には、厳密にはこの空地の影響を考慮すべきであるが、上記のような理由から、現時点ではこれを無視した解析となっている。

本研究では、石神井川の仮設護岸が落下したことにより生じた外水氾濫についても解析の対象としている点が、著者らのこれまでの解析にない特徴である。石神井川に関しては、図-1(a)に地点(1)と示された加賀橋から(3)と示された新柳橋までの3,200mを対象として、いわゆる一次元不定流解析を行うことにした。その際、実績データに基づいて地点(1)で単位幅流量 q を、地点(3)で水位 H を、それぞれ境界条件として与えた。解析に用いた基礎方程式は、以下に示す連続式と運動方程式であり、これらを離散化して解いている。その際、移流項の評価には近年よく用いられるようになったCIP法を適用することにした。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hU) = -\frac{q_{over}}{B_0}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = gi_0 - g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{gn^2}{Rh^{4/3}}U|U| \quad (1a,b)$$

ここに、 h 、 U および R は河川各断面内の平均水深、平均流速ならびに径深であり、 B_0 、 i_0 および g は河川幅、河床勾配ならびに重力加速度である。対象区間の石神井川はいわゆるコンクリート三面張りの河道であるため、解析上これを矩形断面で近似することにし、川幅に関して流下方向に変化しないものとして実データに基づきこれを定めている。また、 q_{over} は河川から堤内地への単位距離当たりの越水流

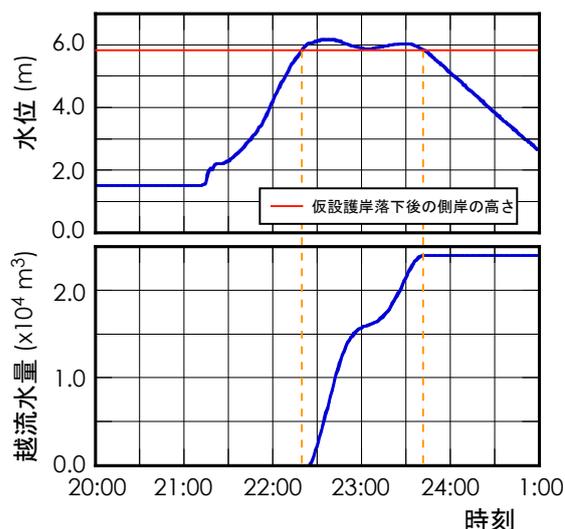


図-3 仮設護岸箇所の水位時間変化と越流量

量を表しており、該当する区間以外では0となる。河川からの越水に関しては次のように取り扱う。仮設の鋼製護岸が落下した区間の側岸の高さが5.8mであることから、時間の経過とともに水位が上昇し、この高さを超える値となる時間帯に対しては、越水が生じるものとし、本間の越流公式を適用してその流量を評価した。

本解析では、道路上・下水道内ならびに河川内の流れを解く際に、その抵抗をManningの粗度係数 n との関係で定めている。ここでは、これまでの解析に倣って、それぞれの値を0.05, 0.013, 0.037として解析を行った。

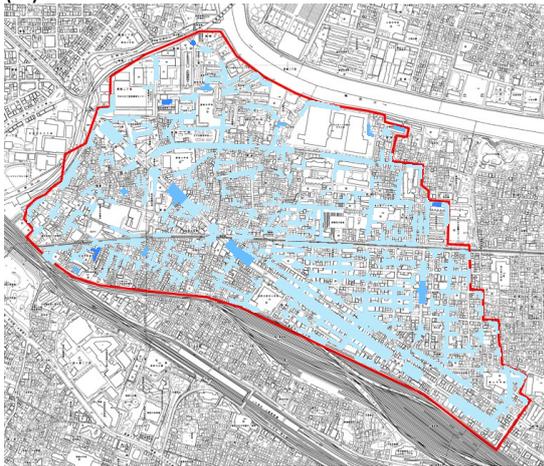
3. 結果と考察

本研究では、次のような3通りの解析を行った。ひとつは、前述した2005年9月の氾濫事例の再現計算(Case 1)である。この場合には、降雨開始から145分後(9月4日22:25)までは降雨による内水による氾濫のみが生じ、それ以降に外水の氾濫が生じるようになった。これに加えて、降雨がないものとして河川水の氾濫のみ生じるとした外水氾濫のみの解析(Case 2)を参考までに行ったほか、河川水の氾濫が生じないものとして、降雨のみによる内水氾濫の解析(Case 3)も行った。そして、これらの結果を比較検討することにより、実際に生じた氾濫被害に及ぼす河川からの越水の影響を明らかにすることを目指す。

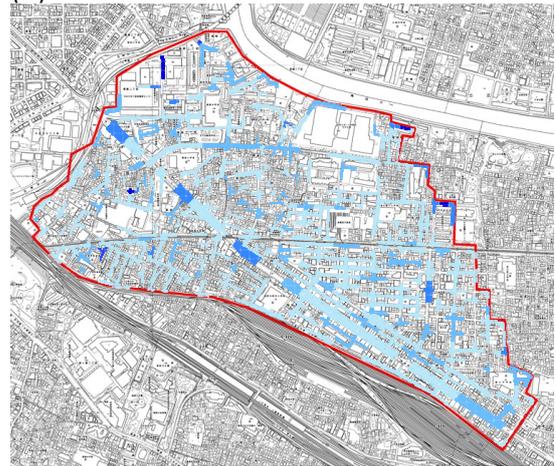
(1) 河川からの越水

図-3には、仮設護岸落下箇所の水位の時間変化と、石神井川から解析範囲内へ越流した水量の累積

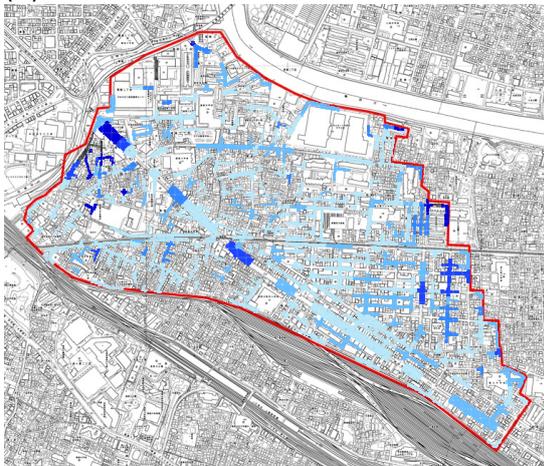
(a) 60 min



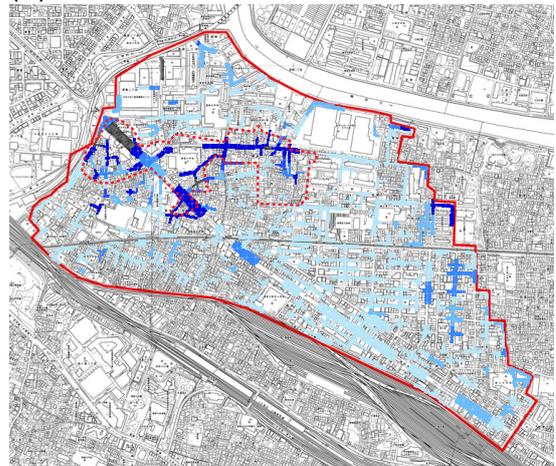
(b) 120 min



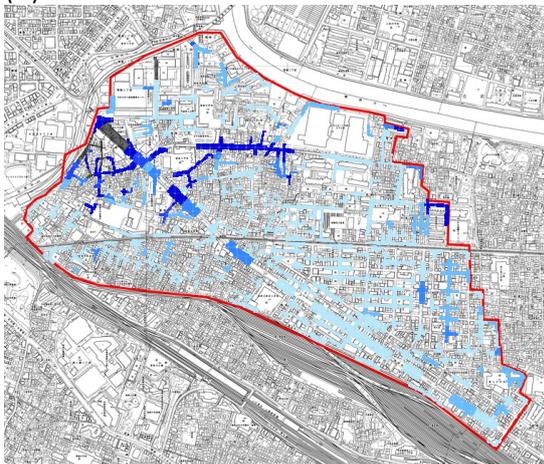
(c) 150 min



(d) 180 min



(e) 210 min



(f) 240 min

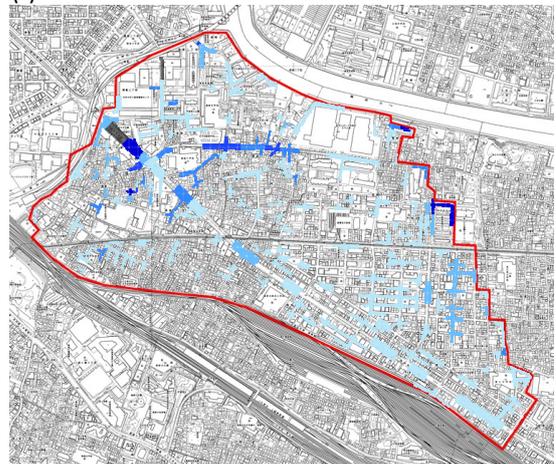


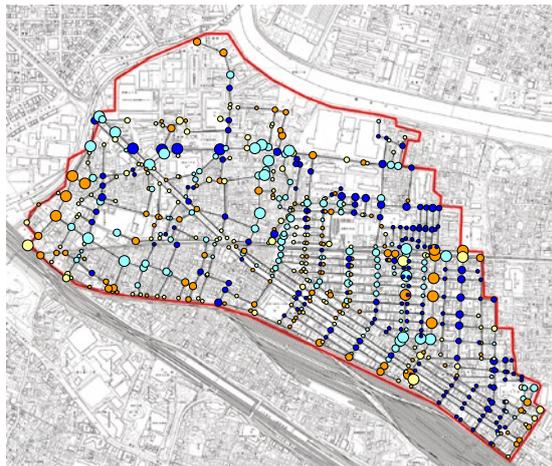
図-4 各時刻における地表の浸水深のコンター図：図中の数字は降雨が開始した20:00を始点とした時刻を表す。河川からの越水が生じるのは145min.以降である。(d)の中の赤の破線は実績浸水範囲を表す。

値の時間変化をそれぞれ示した。図中の赤線は、側岸の高さを表し、これより水位が大きい時間帯に越水が生じることを意味する。解析によれば、河川からの越水は降雨開始の20:00より145分後の22:25から始まり23:35までの70分間にわたって継続し、

24,000m³の水が堤内地に流れ込む結果となった。

(2) 降雨により引き起こされた内水氾濫過程

図-4には、Case 1の解析から得られた地表の浸水深のコンター図を示した。このうち、図-3(a), (b)



● 0～10未満 ● 10～50未満 ● 50～100未満 ● 100%

図-5 下水道の管径に対する水深の比：○印の大きさが管径を、中の赤色の濃淡が水深比をそれぞれ表す。

は降雨が開始した 20:00 から 60 分後ならびに 120 分後の結果を示している。これらは、外水氾濫が生じる前の段階の氾濫状況を表しており、これらの図より、一部の区域において浸水深が 0.2m 以上になることはあるが、それ以外のほとんどの区域ではこれが 0.05m 程度に過ぎないことがわかる。これは、解析範囲内の標高の高低差が小さいため、領域内に降った雨が一区域に偏って集中することはない、領域内に均等に広がったためであると推察される。また、この時間帯における降雨強度はこれ以降のものに比べてそれほど大きいものではないため、下水道網による雨水排除システムにより、地表の氾濫水が比較的速やかに排出されたものと考えられる。

次に、この時間帯における下水道内の水の流れについて見ておくことにする。図-5は、降雨開始 140 分後（越水開始 5 分前の 22:20）における下水道内の各計算点での水深の変化を図示したものである。ここでは、各地点に埋設されている下水管の管径の大きさを○印の大きさで、また、その地点における水深の管径に対する比を丸印の中の色の濃淡で、それぞれ表現している。この図より、越水が始まる直前には、氾濫地点を含む比較的広い範囲における主要な下水道がほぼ満管に近い状態に到っていたことがわかる。後述する河川からの氾濫はこのような状況下で起こっていたと推察される。

(3) 河川水の流入に伴い生じた外水氾濫過程

次に、降雨開始 145 分後（22:25）以降の再現計算の結果について説明する。図-4(c)～(f)には、降雨開始から 150 分後（越水開始から 5 分後）、180 分後（同 35 分後）、210 分後（同 65 分後）、240 分

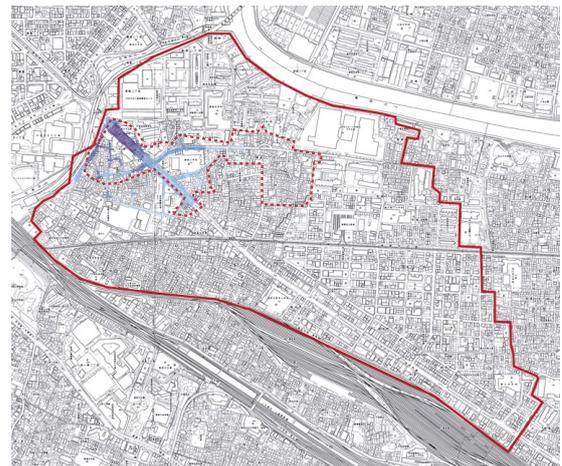


図-6 河川からの越水のみによる氾濫 (Case 2) の場合の浸水深コンター図 (180min.)：赤の破線は実績浸水範囲を表す。凡例は図-4 と同一。

後(同 95 分後)の浸水深コンター図が示されている。この図より、氾濫水が流入した地点付近の浸水深は 0.4m を越え、時間の経過とともにその値が大きくなるのがわかる。これは、下水道が既に満管に近い状態に達していたためにその排水機能が低下しており、その後 1 時間以上にわたって河川から新たに加わった水を処理しきれないことを表す。この氾濫による浸水区域が最も拡大した時刻は概ね越水開始から 35 分後の 23:00 頃と推定されるが、この時刻における浸水深コンター図が図-4(d)である。本解析によれば、氾濫水は明治通りなどの主要な道路を通って拡大し、明治通り上での最大浸水深は 0.4m を越えていたと推定される。そこで、昼間の混雑時であれば深刻な交通麻痺の状態を招いた可能性がある。図-4(d)には、王子消防署の発表による実績浸水範囲を赤の破線で併記してある。現存するデータはこれのみであり、浸水深に関する情報までは残されていないため、定量的に十分な比較にはならないものの、この図より実際の浸水範囲と解析結果とがよく一致していることを見てとることができる。

(4) 外水氾濫の影響評価

次に、この地域に降雨がなく、河川水の越水による氾濫のみがあるとした場合 (Case 2) の解析結果を見ておく。ここでは、下水道が空の状態を初期状態とし、図-3に示した流量の越水が生じるものとした。図-6は、図-4(d)と同じ 180 分後（越水から 35 分後）の解析結果を表す。この図より、図-4の結果に比べて氾濫水の拡大範囲が狭く、浸水深も小さいことがわかる。これは、下水道が氾濫水を排除するのに有効に機能したためと考えられる。

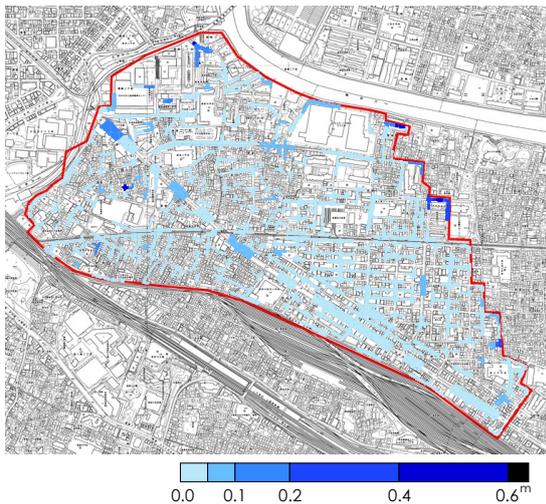


図-7 降雨のみによる氾濫 (Case 3) の場合の浸水深のコンター図 (180min.)

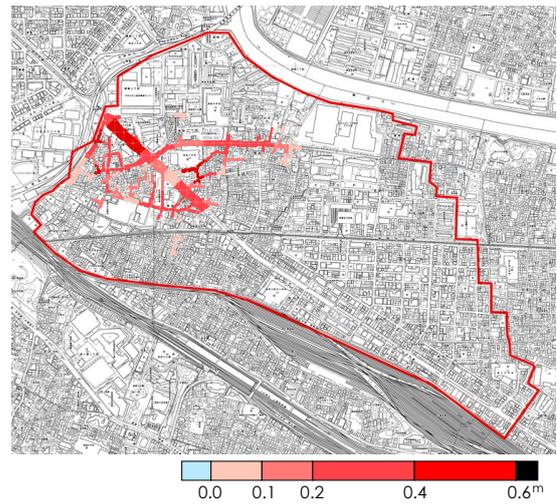


図-8 降雨開始 180 分後の浸水深の差のコンター図 : Case 1 での値から Case 3 でのものを差し引いた結果

一方、河川からの氾濫水の流入がなく豪雨のみにより内水氾濫が生じるとした場合 (Case 3) の解析結果について説明する。図-7には、降雨開始から180分後の道路上の浸水深のコンター図を示している。これは Case 1 の結果である図-4(d) と同一時刻でのものである。Case 3 が降雨のみによる内水氾濫の結果であり、Case 1 が内水・外水氾濫が同時に生じた場合の結果であることから、この両者の浸水深の値の差をとることで、外水氾濫による正味の影響を探ることにした。図-8には、Case 1 の浸水深から Case 3 のものを差し引いた値のコンター図を示す。図の赤い部分が外水氾濫の影響により浸水深が増大した区域を表す。この図より、河川からの氾濫水は主要な幹線道路を通して輸送され、ひとつは明治通りを通じて南東へ、もうひとつは東に延びる幹線道路を通じて東へと広がっていく。しかし、この氾濫水による影響は、流入地点付近の実績浸水範囲に留まることが見てとれ、この区域内の浸水深の増大にのみ強く現れていることがわかる。

4. 結論

本研究では、2005年9月に東京都北区で発生した河川からの越水を伴った都市型水害の再現計算を行った。また、この結果をもとに、対象区域において浸水被害が拡大する過程について考察を加えた。本解析により、豪雨による内水氾濫が生じ、主要な下水道が満管状態に達した後に、河川水の流入が生じたものと判断される。このため、氾濫水を排除するのに下水道はそれほど有効に機能せず、結果として氾濫水の拡大範囲ならびに浸水深が相対的に大き

くなったものと推察される。また、これが比較的長期にわたって浸水深が高い状態を維持した理由と言える。ただし、想定規模をはるかに超えた豪雨であったため、仮に河川水が氾濫しなかったとしてもある程度の規模の内水氾濫は生じたと判断される。なお、浸水深が相対的に大きくなる区域について、内水氾濫のみによる解析の結果と内水・外水複合氾濫によるものとを比較すると、両者が実績浸水範囲として報告されているものとほぼ一致することが確認された。そこで、実績浸水範囲として示された区域が対象地域における浸水ポテンシャルの高い区域と判断され、そこに水が集まるのがこの地域の地形ならびに道路ネットワーク上の特徴であると言える。

謝辞：本研究の遂行に当たり、首都高速道路株式会社より情報の提供を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 関根正人，河上展久：地下街を抱える高度に都市化された地域の内水氾濫に関する数値解析，土木学会論文集，No.789/II-71，47-58，2005.
- 2) 関根正人，河上展久：都市域における内水氾濫と地下鉄に接続する地下空間の浸水に関する数値解析，水工学論文集，第49巻，595-600，2005.
- 3) 関根正人，中村 淳：地下鉄駅が立体的に接続する地下空間における浸水過程に関する数値解析，水工学論文集，第50巻，667-672，2006.

(2007. 9. 30 受付)