

大河川からの越水を想定した 東京東部低平地の外水氾濫解析

NUMERICAL SIMULATION OF INUNDATION PROCESS IN LOWLAND AREAS OF EAST TOKYO CAUSED BY THE OVERFLOW FROM THE ARA RIVER

関根正人¹・秋本健輔²

Masato SEKINE¹ and Kensuke AKIMOTO²

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 学生会員 早稲田大学大学院創造理工学研究科 (同上)

Inundation process in lowland areas of east Tokyo which is bordered by the Ara River and the Sumida River was investigated under the assumption that the overflow from the Ara River into this area occurred. Numerical simulation model was constructed by extending our previous computational model to evaluate the flows in vacant lands as well as on the road-networks in this area. The overflow point and its discharge were the assumed one in this stage. As a result of this simulation, the time series of information about the flow path of inundated water were obtained, and the characteristics of inundation in this area were made clear. This kind of information must be useful when we make a plan of evacuation route if we experience such serious inundation.

Key words : *Inundation by overflow from river, road network, open space, numerical analysis.*

1. 序論

近年, 地球温暖化の影響から東京においても想定規模を上回る豪雨に見舞われるようになってきた。たとえば, 東京都 23 区の西部地域では, 2005 年 9 月に台風 14 号の接近に伴って時間雨量 100mm を超える規模の集中豪雨が発生した。こうした状況下で今進めておくべきことは, 想定を上回る豪雨が生じた場合に都内のどの区域でどのような浸水被害が生じる可能性があり, そのプロセスはどのようなになるか, といったことを予め把握しておくことではないかと考える。こうした観点から, 著者らは, これまで都心部の高度に都市化された区域を対象とした内水氾濫ならびに地下空間の浸水の過程について研究を進め, 予想される被害について報告してきた^{1), 2)}。本研究では, その次の段階として, 豪雨により大河川が増水し, その水が堤防を越えて越水し堤内地に氾濫する一すなわち外水氾濫一過程を検討の対象とする。東京都では前述の 2005 年 9 月に想定をはるかに上回る豪雨に見舞われたため, 神田川水系の妙正寺川や石神井川の水があふれ出し, 外水

氾濫被害が生じることとなった。このうち, 石神井川の氾濫被害に関しては, 既に調査ならびに数値解析を実施し, その成果を報告した³⁾。現時点において東京での被害は, 比較的小規模なものに留まっており, 東海豪雨に匹敵するようなカタストロフィックな水害は生じていない。しかし, 潜在的な危険が懸念される地域もあり, そのひとつとして荒川と隅田川で挟まれた東京東部の低平地をあげることができる。本研究ではこの区域を研究の対象として取り上げる。そして, 万一この区域に外水氾濫が生じるとすれば, どのような経路をたどって氾濫水が伝播し, どの程度の規模の被害となり得るかを把握することを目的とする。

ところで, 外水氾濫解析に関しては, ここ数年のうちに多く計算手法が開発され, 実流域に適用されてきている^{4), 5), 6), 7), 8)}。その中には非構格子を用いたより精緻な解析も多く見られるほか, 街路ネットワークモデルによる解析⁸⁾も行われている。著者らの解析は, 後者と類似点が多く, 前者に比べればはるかに簡易的なものと言うことができ, 小さな路地にまで及ぶ一本一本の道路とその交差点につ

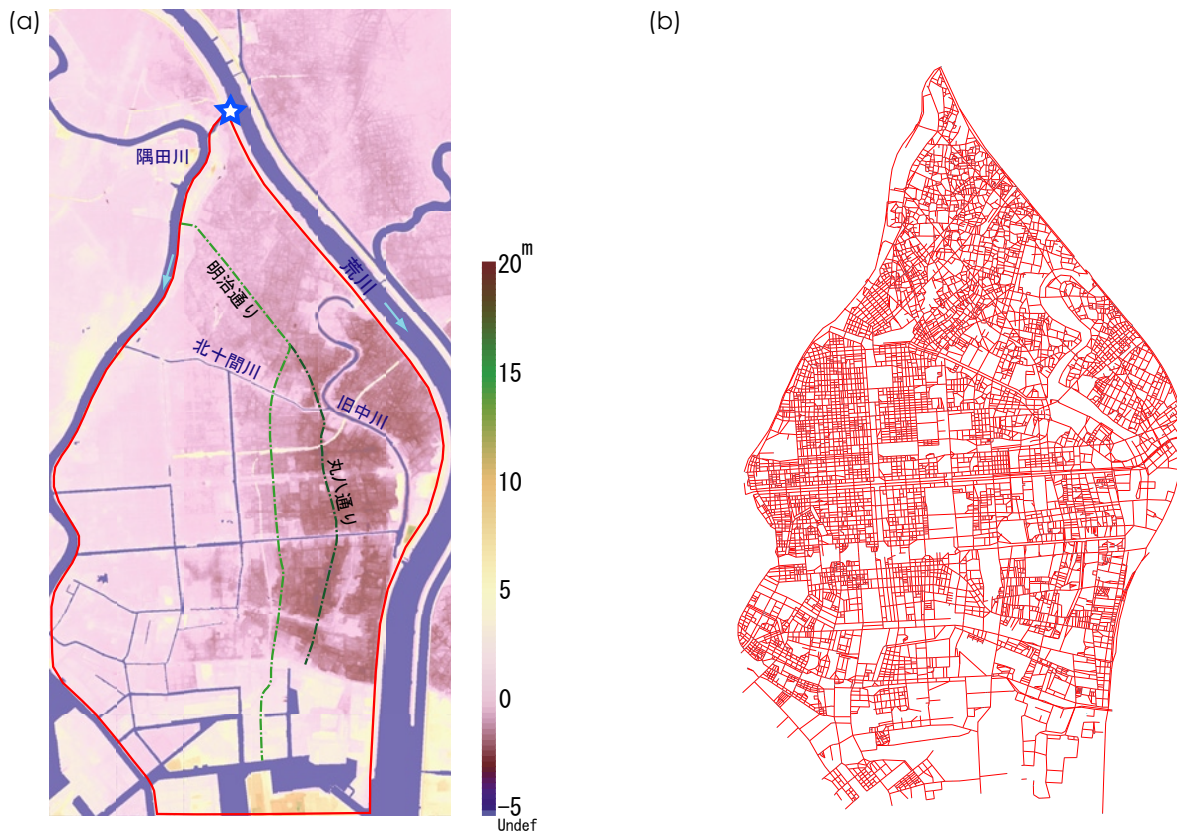


図-1 解析対象区域の概要と道路ネットワーク図：(a) 図中の赤線で囲まれた範囲が対象区域であり，☆印を付した地点を越水想定地点とした．この区域には北十間川・旧中川などの水路があるが，基本的に流れはない．北十間川の北側に沿って高さ3mの護岸壁が連なっている．(b) 解析対象とした道路ネットワーク図

いての数値情報を考慮することで実際の道路ネットワークを忠実に再現した上で，この道路上の水の流れと交差点上の浸水深を計算するものである．この解析法は，高度に都市化が進んだ流域に適用されるべきものであり，交差点以外にも必要に応じて計算点を追加することで，空間分解能を任意にかつ容易に上げることができるという特徴をもつ．ただし，道路群で囲まれた区域に空地がある場合には，そこに滞留したりあるいは通り抜ける氾濫水の影響を別途考慮に入れることが必要となる．著者らのこれまでの解析モデルではこの点の考慮ができなかったが，本研究ではこの空地における水の流れをも解析に取り入れるようモデルの拡張を行った．また，この区域には上下流端を水門で閉めきられた水路（内部河川）が複数通っている．そのため，道路上の氾濫水がこのような水路に架かる橋の上にさしかかると，その水の多くが河川に流れ落ちたり，条件によってはそれが対岸にわたることもある．一方，堤内地を流下してきた氾濫水の水位が水路沿いの護岸壁の高さを越えるならば，水路へ水が流れ込むことになるほか，この水路内の水位が対岸の護岸高さを越えれば，対岸の堤内地側でも浸水が始まることになる．本研究では，対象区域内に存在する空地や，水路な

らびにそこに架かる橋についての現地踏査を実施し，その結果を踏まえて，個々の空地・水路・橋ならびに護岸壁の実態に即した取り扱いを可能にするサブモデルを作成し，これまでの解析法にこれらを組み込むことで，対象区域内の外水氾濫解析を行った．

2. 解析概要

(1) 解析対象区域

本研究では，図-1に示すような東を荒川，西を隅田川によって挟まれ，南に東京湾に面した比較的大きな区域を解析の対象とする．また，ここでは，荒川からの水が☆印を付した地点からこの区域内に越水して流入するものと仮定する．なお，この地点は，国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務所により公表されている同区域の氾濫シミュレーション⁴⁾における破堤点とほぼ一致する．また，仮に $100 \text{ m}^3/\text{s}$ の水が12時間にわたって流入するとした解析結果を示し，これを例に考察を加えていく．これにより，対象とする区域を伝播する氾濫水の経路や浸水上の特徴，さらにはこれに及ぼす後述する水路の影響などを明らかにすることを目指す．ただし，

この越流流量がさらに大きくなった場合の浸水規模や越水地点が大きく異なる場合の浸水経路に関しては、新たな解析が必要となるため、これについては今後の課題と位置付けている。

図-1には、解析対象区域内の地表の標高の分布図を色分けして示した。この区域には、標高が東京湾の水面より低い区域が広がっており、浸水が絶えず懸念されてきた区域である。図中の色の最も濃い部分が海面下の区域に相当する。この区域の特徴としては、図-1よりわかるように(1)地形的に見て大きな起伏がないこと、ただし、(2)傾向として区域内の東側半分に標高の特に低い区域が広がっていること、ならびに(3)この区域を東西に貫くように北十間川・旧中川などの小規模の水路が貫いており、もし、この水路を越えて氾濫水が南下するとすれば、被害が想定される地域は南に大きく拡大することになること、などを挙げることができる。この北十間川・旧中川に関しては、その北側に沿って高さ3mにも及ぶ護岸壁が連なっていることに注意が必要であり、かなりの規模の氾濫でない限りこの水路を越えて水が南下することはあり得ない。また、この区域には、著者らがこれまで解析対象としてきた都内の高度に都市化された区域に比べて、小・中学校の校庭、公立の運動公園ならびにオープンスペースを有する公営住宅などが点在しており、これらの空地を考慮することが望ましい。本研究では、合計43箇所の空地を考慮することにし、この取り扱いを解析モデルに組み込んだ。

(2) 数値解析モデル

ここでは、対象区域内に流入した水が図-1(b)に示した道路ネットワーク上を流れ下るものとして、浸水区域が拡大していく過程を数値解析により明らかにする。その際、氾濫水が滞留したり通過したりして氾濫水の全体的な流動パターンにある程度の影響を及ぼすと考えられる「空地への水の流入」を考慮する。ただし、ここでは道路ネットワークの下に敷設されている下水道網の影響については考慮していない。これは、河川からの越流水の影響により氾濫初期の段階で下水道が満管状態となり、それ以降しばらくは地上の氾濫水が下水道によって効率的に排除されることが期待できないと考えたためである。この点に関しては、別途行っている解析²⁾の結果とも一致し、大きな矛盾はないものとする。また、この区域の建坪率は最低でも60%であり、ほとんどの土地に建物が建ち並んでいる。そのため、宅地や店舗の間の狭い空き地や建物の中にまで水が入り込む可能性があるものの、その影響はそれほど

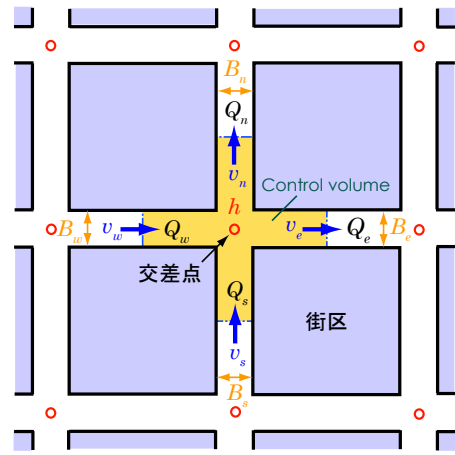


図-2 道路ネットワーク上の流れの解析の概念図

大きくないものと判断している。そこで、前述の特定の大規模な空地を除けば、道路以外の空間を水の通り道として考慮することはしない。このことは、道路上の浸水深が実際に生じるものよりは少し大きめに評価されることを意味する。しかし、氾濫水が広がっていく経路と対象区域内の浸水特性とを把握する目的からすると、大きな障害とはならないと考えている。

道路上の氾濫水の流れに関しては、著者らのこれまでの解析手法と同一のものをを用いる。本解析では、図-2に示す概念図のように道路交差点上に水深の計算格子点を、交差点を結ぶ道路の垂直二等分線上に流速の計算点をとることとする。流速の計算は、移流項を除くすべての項を考慮した一次元の運動方程式に依拠し、これを離散化して解いている。また、水深の計算は、対象となる交差点を中心とし、隣接する交差点との間に引かれた垂直二等分線によって囲まれた図-2に示されるようなコントロール・ボリュームをとり、これに対して行うものとし、そこへ出入りする水の体積保存則(すなわち連続式)から水深を計算する。ここで解析に用いた運動方程式ならびに連続式は以下の通りである。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (\eta + h) - \frac{\tau}{\rho g h_o}, \quad \tau = \frac{\rho g n^2}{h_o^{1/3}} v^2$$

$$A \times \frac{\partial h}{\partial t} = (Q_w + Q_s) - (Q_e + Q_n) \quad (1a, b)$$

ここに、 v は図-2に示したコントロール・ボリュームの境界面における流速であり、 η は交差点の標高、 A はコントロール・ボリューム内の道路面積であり、 h_o は流速計算点における水深を表す。なお、これ以外の変数は図-2に定義したとおりである。本解析において対象領域内にとられた水深計算点は合計11623点であり、道路総本数は18165本となった。また、道路幅 B としては歩道を含めた全幅とし、

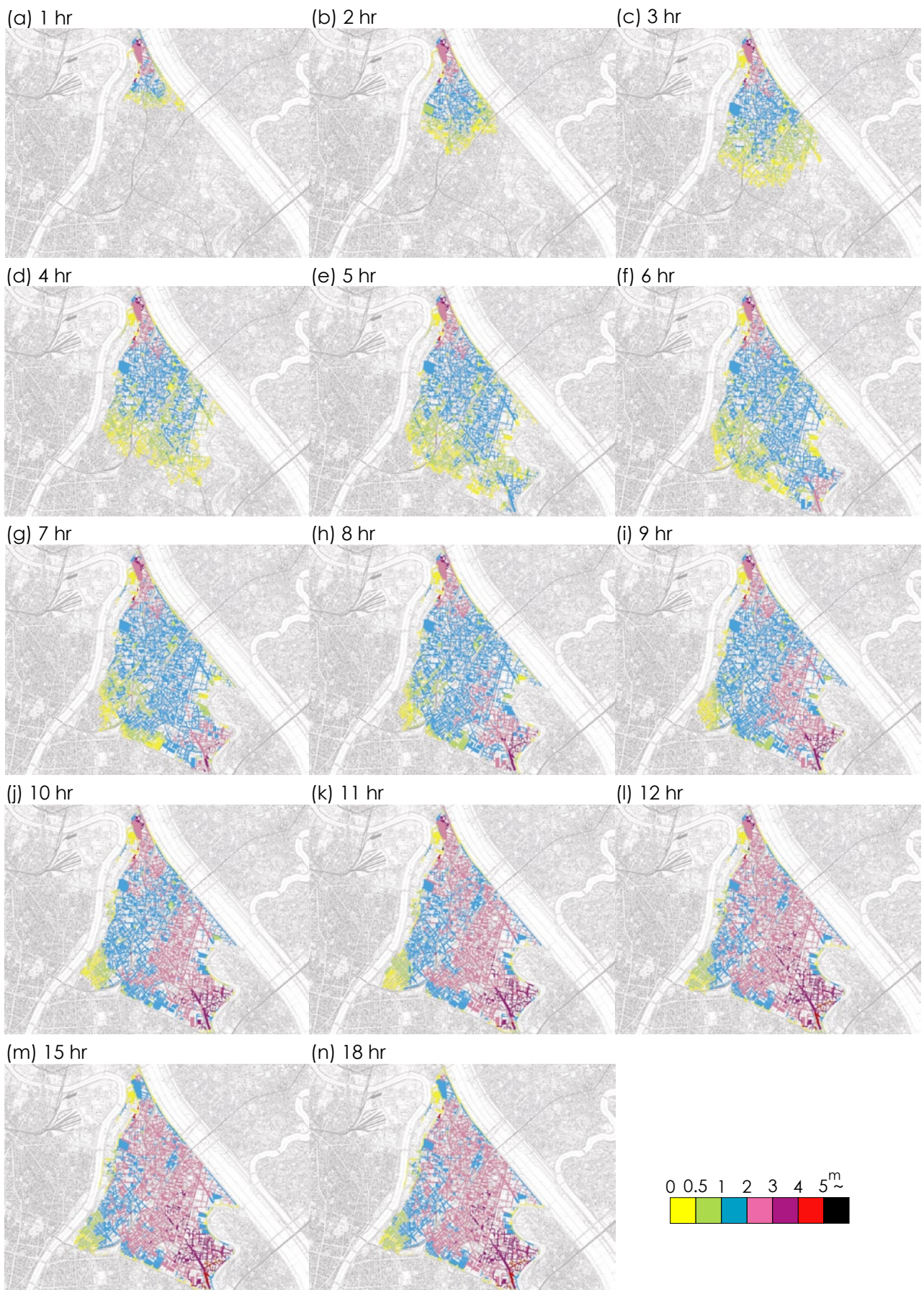
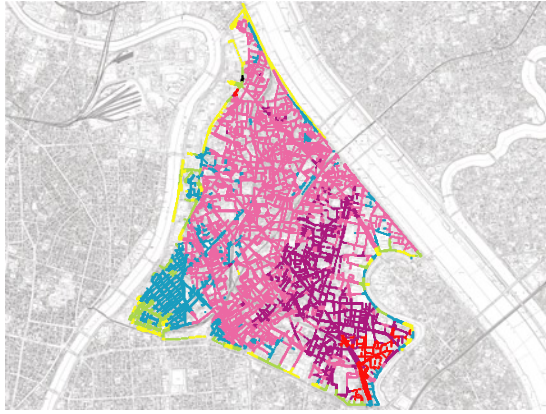


図-3 対象区域内の浸水深分布図の時間変化：時刻は越水開始後のものを表す。越水は12時間継続後止むものとする。
7時間以降の浸水範囲に大きな変化が見られないが、これは氾濫水がその下方境界に沿って存在する水路の護岸壁を越えられないためである。

(a) 空地の影響を考慮しない解析結果



(b) 空地の影響を考慮した解析結果

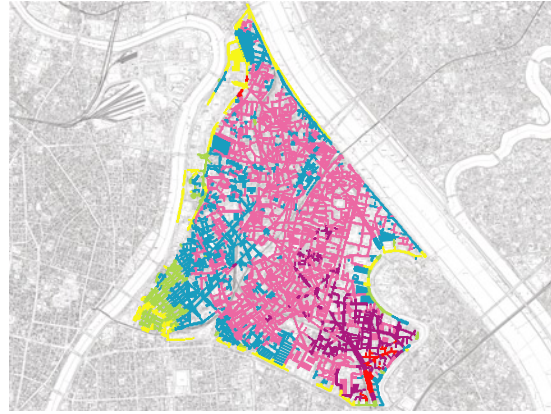


図-4 浸水深分布図で見る空地の影響（越水開始から 18 時間後）：右側の (b) は図-3(n) と同一。

これが水の通り道になると考えた。また、道路上の流れを評価する際に必要となる Manning の粗度係数を 0.05、時間刻みを 0.01 秒とした。

また h, 空地における流れに関しては、次のように取り扱うことにした。すなわち、空地を幅の広い一本の道路と見なし、空地の中央に水深の計算点をおくほか、空地に面した道路上にも同様の計算点をおくことで、他の道路上の計算と同一の手法によりその流れを解析した。なお、空地の規模が大きくなると、任意の時刻に空地内を移動する水の流れのフロントの位置が実際とは異なってくる可能性があるが、平均的に見た水の収支はとれており、おおきな問題はないものと考えている。

さらに、北十間川のような小水路に架かる橋の上の水の流れに関しては、次のように取り扱うことにした。すなわち、橋の中央ならびに橋の両端に位置する道路上にそれぞれ水深計算点を取り、道路上の流れと同一の手法で水深ならびに流速を計算したが、その際に、橋の中央にとられた点の水深に応じて、段落ち公式により評価される量の水を橋上から水路内へ流入させることにした。また、もしこの水路の北側に沿う道路上の水深が、護岸壁の高さである 3 m を越えるならば、堤内地側の水が水路内へ流れ込むことになるため、これを考慮した解析を行うものとした。ただし、結果的に見れば、本解析の設定条件下で、氾濫水が橋の上から水路内に流入したり対岸に渡るようなことはなく、また、堤内地側の水が護岸壁を越えることもなかった。このように浸水が生じた範囲は対象区域全体から見るとその上方 1/4 程度の範囲に留まり、北十間川ならびに旧中川を越えることはなかった。また、解析モデル上、これらの水路内の流れを一次元不定流解析により計算することにしていたが、実際にこの計算が必要になることもなかった。

3. 結果と考察

本研究では、小・中学校の校庭や公営団地内の広場・通路といった空地が浸水状況に及ぼす影響をも明らかにするために、空地を考慮した解析とこれを一切考慮しなかったものとの二つを行った。

まず、図-3 には空地における流れを考慮して行った解析の結果をまとめて示した。この図は、実際に氾濫水が到達した範囲のみを抜き出して描いてものであり、各時刻における浸水深分布図を色分けして示した。この図には、浸水深がほとんど変化しなくなる越水後 18 時間後までの結果が示されている。なお、実際にはこの時刻あたりになると下水道の効果が現れ始め、浸水深の低下が見られるはずであるが、ここでは下水道を考慮していないため、上記のような結果となっている。前述の通り、氾濫水が北十間川ならびに旧中川を越えて南下することはない。また、図-1 の標高分布図の赤色の濃い部分と見比べると、これらの水路の北東側に位置する標高の低い地域に氾濫水が導かれ、数 m を超える浸水が生じていることが見てとれる。これは、既に繰り返し述べてきたように、水路の浸水区域側に沿ってつくられている護岸壁の影響である。すなわち、いざこのような氾濫が生じた場合には、この護岸壁によって氾濫水が堤内地側に堰き止められることになり、被害区域の拡大は防げるものの、この区域の被害を深刻化させることになる判断される。このほか、氾濫水が幹線道路を経由して比較的速やかに南に向かって広がるパターンを見てとることができる。この区域の場合、明治通りと丸八通りの二つが主たる水の通り道となることがわかる。この明治通り上の流れの流速について簡単にふれておく。解析結果のうち浸水深が 0.5 m 以上の地点に注目すると、浸水域が拡大している時間帯にある 3 時間後（図

-3(c))には最大0.5 m/s程度の流れであった。その後、6時間後(図-3(f))にはこれが0.2 m/s程度まで低下し、12時間後以降は有意な流れが生じなくなるなどの結果を得ている。図-3のような一連の図は、浸水深の大小を判断する目的に加えて、どの道路がたとえば緊急車両の通行に使えるか、どの交差点がその際の通過点となり得るかといった判断を下す際に有益な情報となると考えており、最大浸水深のみ示した従来のハザードマップでは読み取れない情報を与えるものと考えている。

ここで、あくまでも参考までに、国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務所により公表されている同区域の氾濫シミュレーション結果⁴⁾についてふれる。このシミュレーションは、想定している流量が本解析のものよりも大きいとはいえ、次のような差異が認められた。まず、同事務所による結果は図-3に比べて明らかに空間分解能が低く、氾濫水の経路を識別することが容易でないため、この結果に基づき、たとえば前述したような浸水時にどの道路が通行可能かを判断することは不可能に近い。さらに、氾濫水がいたともたやすく前述の水路を越えて南下し、拡大する結果となっている。この解析の詳細が定かでないため推測の域を出ないが、この解析には水路群の取り扱いに問題があるように思われる。

最後に、図-4には、空地への水の出入りを考慮に入れずに行った解析と、考慮した解析の結果とを比較のため並べて示してある。この図より、空地に流入して滞留する水の流れを考慮に入れると、一部区域の浸水深が低下することが見てとれる。特に3 m以上の浸水深となる区域に注目すると、図-4(b)の方がその面積が小さくなっており、上記のことが理解されよう。ただし、氾濫水が広がるパターンを知る上では大した差とはならないことも確認できる。なお、図-3ならびに図-4(b)において白に塗り分けられている区域の大半は、規模の大きな建物によって占められており、空地と言えるスペースはほとんどないことに注意されたい。

4. 結論

本研究では、東京東部に広がる低平地を解析の対象として、荒川からの越水が生じた場合を想定した外水氾濫解析を行った。ここでは、道路ネットワーク上を氾濫水が流下するものとした従来の著者らの解析モデルを拡張し、道路に囲まれた空地や道路に接続する橋、あるいは区域内部に横たわる水路の影響を考慮に入れた数値シミュレーションを行った。これにより、対象区域内を氾濫水が流れ下る経路が

把握されるとともに、この区域の浸水上の特徴が理解された。

本研究の成果は、以下のように活用されることが望ましい。まず第一に、住民が自ら浸水危険度を認識するための基礎情報となると考える。また、行政やライフラインを管理する側からすると、いざ氾濫が起こった場合に、どの道路が緊急車両の通行に適しているかを判断する際に、このような解析結果は有益な情報となるであろう。今後に残された課題は少なくないが、このような解析の結果をよりわかりやすく伝える方法についても検討していく必要であると考えている。

謝辞：本研究を行うに当たり、中村 淳氏(当時、早稲田大学大学院学生)の支援を受けた。ここに記して謝意を表します。また、本研究の一部が、日本学術振興会科学研究費基盤研究C(研究代表者：関根正人、課題番号：19560517)の補助を受けて行われたことを付記する。

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，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。
- 3) 関根正人，中村 淳，中村康朋：2005年に石神井川流域で発生した外水氾濫に関する数値解析，土木学会第62回年次学術講演会概要集，2-187，2007。
- 4) 国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務所：荒川水系荒川浸水想定区域図，<http://itgis.ara.go.jp/arahzd/app/map/main.jsp>，2004年9月10日公表。
- 5) 川池健司，丸山寛起，吉本静麿，野口正人：諫早低平地における氾濫解析とその浸水被害軽減策への応用に関する研究，水工学論文集，第49巻，565-570，2005。
- 6) 武田 誠，松尾直規，山中威士，森田 豊：総合的な氾濫解析システムの構築に関する研究，水工学論文集，第49巻，613-618，2005。
- 7) 秋山壽一郎，重枝未玲：河道特性と市街地構造を考慮した越水・破堤氾濫シミュレーション，水工学論文集，第50巻，691-696，2006。
- 8) 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，533-538，1999。

(2007. 9. 30 受付)