

2014 年度（第 50 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-A-2

大都市域における浸水危険性の評価手法と それに基づく避難誘導

早稲田大学 教授

関根正人

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014 年 8 月

大都市域における浸水危険性の評価手法とそれに基づく避難誘導

Numerical Prediction of Inundation in Highly-urbanized Area and Evacuation Movement Simulation from Underground Space

関 根 正 人

Masato SEKINE

1. はじめに

地球規模での気候の極端化が指摘されてきている昨今、我が国でも各地でこれまでにない規模の豪雨に襲われるようになった。たとえば、2011年の九州北部豪雨、2012年の紀伊半島豪雨、2013年の伊豆大島豪雨、同年の京都ならびに名古屋の豪雨などは記憶に新しいところであろう。これらのうち名古屋と京都の事例を除けば、いずれも都市化の進んでいない地域で発生したものであり、豪雨に伴う斜面崩壊や中小河川の決壊などにより甚大な被害にまで到った。これは土砂災害と呼ぶべきものであり、本稿で対象とする「高度に都市化された区域」で発生する「都市浸水」とは発生のメカニズムが明らかに異なる。

東京をはじめとする大都市では、近年、高強度の局地的集中豪雨に繰り返し見舞われるようになった。以下、東京を例に説明すると、都市域は下水道ネットワークと都市河川からなる「雨水排除システム」により豪雨から守られている。そのため、設計強度を下回る強さの雨であれば浸水が発生することはない。しかし、河川が大氾濫を起こすほどの豪雨でなくても、下水道の設計値を超える高強度の雨が降ると、地上に水が取り残され「都市浸水」が発生する。東京で発生する浸水被害の大半はこの「内水氾濫」である。最近では、継続時間は1時間程度と短いものの、その強度が70~90mm/hを越えるような豪雨が頻発している。今後、その強度が増大するかあるいは継続時間が大きくなると、発生する浸水はこれまでになく深刻なものとなるおそれがある。その一方で、高度に都市化された東京都心部などでは、都市生活者の利便性や経済効果などを考慮して大規模な地下空間が開発されている。地下鉄も都市域全体を網羅するように縦横に延びている。都市浸水時に最も避けなければいけない最悪のシナリオは、地上の氾濫水が連絡階段を通じて地下空間にまで到り、「地下浸水」が引き起こされることである。2000年以降に限っても東京・名古屋・大阪・福岡などの大都市で地下浸水が発生しており、昨年名古屋の事例は記憶に新しいところである。

一方、今後、巨大台風が首都圏を襲い、上流域で降った豪雨の影響でたとえば荒川の水が河川堤防を越えて堤内地側に流れ込むことになるとすると、都市域全体が水没するほどの大規模な浸水にまで発展することがあり得る¹⁾。東京が抱えるもうひとつの浸水被害としてこのような「外水氾濫」があり得る。これは、局地的集中豪雨に比べて発生頻度が低いものの発生した場合の被害は甚大であり、国家的な危機にまで到る可能性がある。このような危機は起こらないものと楽観したり、目を背けたりするのではなく、実際に起こるとすればどの程度の規模になり、氾濫水はどのような経路をたどって拡大するのか、といったことを科学的に明らかにしておくことこそ重要である。

これまでにない豪雨から都市を守り、浸水被害の軽減を実現していくためには、都市で発生する浸水を可能な限り精緻に予測する手法あるいは技術が必要であり、これが実務に有効に活用されていくことが重要である。このような点に鑑み、著者は、東京で発生する浸水・氾濫をできるだけ現実的に即して精緻に数値予測する手法の開発を進めるとともに、東京23区内の浸水危険性を明らかにするための研究を積み重ねてきている^{2),3)}。その手法については次章で説明するが、実在する道路・下水道などのインフラに関しては一切省略することなく考慮し、しかも可能な限り水理学上の基礎原理のみに依拠した厳密な予測計算手法となるように心がけた。ここでは、不確かな仮定や近似を持ち込むことはなく、数字あわせのために補正係数を導入した

りすることも一切してない。そのため、高精度でかつ信頼性も高い浸水・氾濫予測手法ができあがったと考えている。

本稿では、東京都心部で発生が懸念されている二つの浸水イベント、すなわち、(i) 短時間・高強度の集中豪雨によって地下浸水にまで到る内水氾濫と、(ii) 大河川からの越水が生じた際の大規模な外水氾濫、が生じた場合について、詳細な数値予測を行った結果について説明する。また、これを踏まえて、東京都心部の浸水危険性について論じるとともに、被害軽減に向けてとるべき対策についてもふれることとする。

2. 高度に都市化された区域の浸水・氾濫の数値予測手法

東京23区では、これまで時間雨量50mmの豪雨を設計強度として下水道ならびに都市河川の整備が行われてきた。下水道と都市河川により構成される「雨水排除システム」は、(i) 雨水ます経由で下水道に運び込むことにより、都市に降った雨水を地表面から排除する、(ii) 下水道内の水を地上に逆流させることなく神田川などの都市河川まで運ぶ、(iii) 都市河川の水を再び都市域に溢れ出すことなく東京湾まで運ぶ、という3つのプロセスにより完結する。もしいずれの一つでも機能しない事態となれば「都市浸水」が引き起こされることになる。

実在するこのような雨水排除システムをできる限り忠実に再現しつつ、「都市浸水」を数値予測する手法として、著者により開発されてきた「街路ネットワーク浸水・氾濫解析手法」^{2), 3)}がある。本章では、図-1を参照しながらこの手法の概要を簡潔に述べる。

東京23区内には、かなり高密度の道路ネットワークができあがっており、地表面積に占める道路の面積比率は30%を超える。この区域内で発生する氾濫水の流れについて考えるとき、「道路」とこれにより囲まれた「街区」とに分けて取り扱うのが最も理に適っていると言える。このうち街区は高層ビル群が林立する区域か住宅密集区域になっている。例外となるのは、皇居や日比谷公園などに代表されるオープンスペースや、わずかに見られる学校の校庭くらいである。さらに、東京都心部の土地利用状況を建ぺい率の値を基に判断すると、街区の60%～80%が建物により占められており、街区を横切るような流れが生じるスペースはほとんどなく、わずかに建物群の谷間に残されているにすぎない。このため、東京23区で浸水・氾濫が発生した場合には、水の流れは道路ネットワーク上で起こると考えるべきである。このような理由から、高度に都市化された区域における浸水の数値予測は、他の研究者^{4)・7)}による平面二次元解析ではなく、ここで説明する「街路ネットワーク浸水・氾濫解析手法」により行う方がはるかに合理的であり、高精度にもかかわらず高速の予測が可能である。なお、本手法の妥当性に関しては可能な限りの検証が完了している。具体的には、2005年に妙正寺川流域で発生した浸水・氾濫の事例と、2008年に雑司ヶ谷幹線下水道で発生した水難事故時の下水道への雨水集中の事例を検討対象として再現計算を行い、その結果を観測データと直接比較している。その結果として、本手法により二つの事例がかなり正確に再現されることが確認された。

この手法による主な計算は、(a) 道路上の氾濫水の流れ、(b) 下水道内の流れ、(c) 河川の流れ、(d) 街区に降った雨の流れに関するものであり、これに必要に応じて (e) 地下空間内の浸水の計算が加わる。この計算では、連続式と運動方程式のみに依拠した厳密なものとなるように努め、下水道内の流れの解析に導入したスロットモデルを除けば、近似やモデルと言えるものは導入していない。この計算に当たっては、図-1の概念図に矢印で示されている水の流れ、すなわち、雨水ますを介した「道路面と下水道」との間の水の流入や、雨水吐を介した「下水道と河川」との間でのもの、さらには「道路と街区」ならびに「道路と河川」との間の水の出入り、を的確に評価する必要がある。これらについても可能な限り厳密かつ正確な評価ができるようになっている。このように実在するインフラの詳しいデータや土地利用に関する情報をすべて入力し、これを忠実に反映させた予測計算を行うことにより、都市が浸水していくプロセスが精密に解き明かされることになる。この解析には、実在するすべての道路ならびに交差点についてのデータや、枝管路に到るすべての下水管ならびにマンホール点の情報が予めデータベースとしてまとめられ、これが考慮されている。

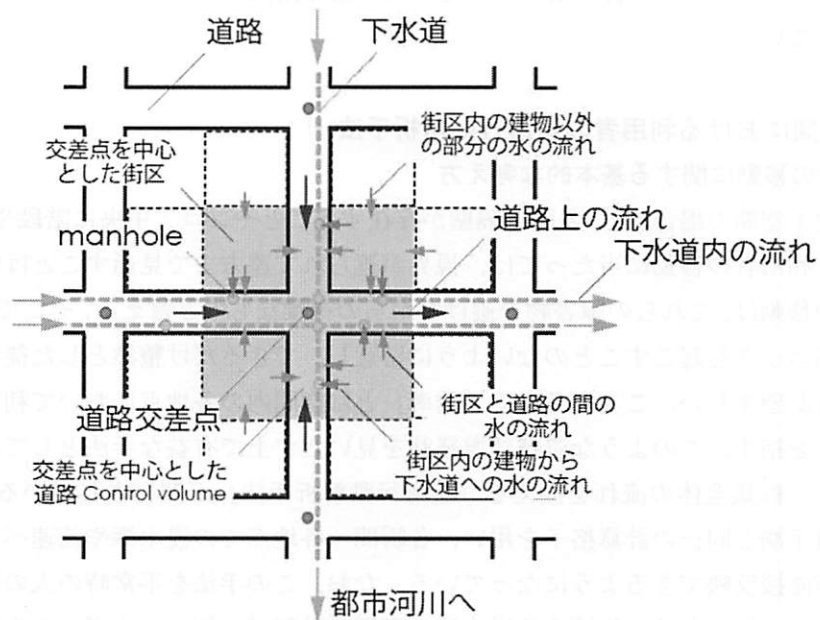


図-1 街路ネットワーク氾濫解析手法の概念図：道路交差点周りの Control volume と、これと接する「街区」の部分は異なる色で着色されている。

なお、道路上の流れについて説明を補足すると、その勾配変化点や地下空間への連絡口付近にはさらに計算点が追加されており、そのすべての道路点における浸水深の時間変化が計算されることになる。下水道や都市河川についても同様のことが言える。解析対象区域の設定に当たっては、その境界となる道路を横切る流れが生じないように留意したほか、原則として下水道処理区をひとつの単位とし、これと同一かまたはこれよりもわずかに大きくなるようにしている。また、区域内に都市河川が流れている場合には、その流域はすべて内部に含まれるようにした。これにより、流域に降った雨が地上ならびに下水道内を経由して都市河川に流入するプロセスを忠実に計算することができ、「下水道・都市河川内の流れの一体解析」が実現されている。従来の都市河川の洪水氾濫解析を見ると、そのほとんどが流域から都市河川へ流入する流量を「流出解析モデル」などにより評価した上で河川の流れを計算している。著者の理解が確かならば、流出解析モデルには既往の降雨データに基づいて同定すべきパラメータが内在し、これを定めるためのキャリブレーションを経ることによりその予測精度が保証されている。しかし、これまでに経験したことのない高強度の豪雨に対してまでこのパラメータの値が有効かと問われれば、誰も確かなことは言えないであろう。これに対して、本手法では雨水が運ばれていくプロセスをすべて支配方程式に基づき解いているため、下水道から都市河川へ流入する流量も双方の流れの状態を反映した形で適切に評価されている。すなわち、河川の水位が上昇すればそれに応じて下水道内の疎通能力が低下し、状況によっては河川から下水道への逆流が発生することもあり得る。この手法ではこうしたこともすべて考慮された解析となっている。また、解析に当たっては、入力情報として降雨データが必要であることは言うまでもないが、これ以外には都市河川の初期水位や、下流端境界条件としてたとえば河口の水位の値を別途与える必要があるものの、その他の観測データを一切必要としないという利点がある。

さらに、もし地上で浸水が生じる道路点付近に地下空間へとつながる連絡口が存在する場合には、地下空間内の浸水に関わる計算が必要となる。本手法では、地上ならびに地下空間における浸水のプロセスを一体のものとして計算するシステムになっている⁸⁾。地下空間の浸水予測は、地下空間内のフロアを一辺が1mの正方形の Control volume (以下、これを「計算格子」と呼ぶ)の集合体に分割し、スタッガード格子の考え方に基づいた平面二次元解析により行われる。具体的には、計算格子毎の水深ならびに流速ベクトルの値を

時々刻々求めていく。その際、各フロアをつなぐ連絡階段についても、階段一段分を一単位としてその上の流れを解いている。

3. 地下空間における利用者の避難行動解析手法⁹⁾

3.1 利用者の移動に関する基本的な考え方

大規模地下空間の場合には、各所に隔壁が存在することやフロア中央に階段や柱があることも稀ではない。そのため、利用者の移動に当たっては、視界が遮られて遠方まで見通すことは容易ではない。この空間内での利用者の移動は、これらの障害物を避けながらの複雑なものと言える。そこで、いざというときの避難は、利用者がパニックを起こすことのないように留意し、できるだけ整然とした徒歩による移動となるように誘導することが望ましい。ここで考える「誘導」とは空間内の各地点において利用者が移動すべき方向を指示することを指す。このような避難誘導経路を見いだす上で有益な手法として、個々の利用者の移動を数値的に追跡し、群集全体の流れを捉える「避難行動解析手法」が開発されている⁹⁾。浸水時の解析には、地下浸水の数値予測と同一の計算格子を用い、各瞬間・各地点での浸水深や流速ベクトルに応じた利用者の移動への影響が直接反映できるようになっている。なお、この手法を平常時の人の乗り換え行動の数値模擬に適用することも容易である。後述する浸水時の避難行動解析の例は、まずは平常時の乗り換え行動の計算を行い、全体として見た場合の移動状況が平衡状態に達したのを確認し、その直後に浸水が始まるという設定で計算を行ったものである。

この手法の概要を以下に説明する。ここでは、地下空間内を移動するすべての利用者の時々刻々の座標ならびに移動座標を計算するとともに、前述の計算格子毎に混雑状況を表す指標である「群集密度」を求めている。前者は個々の利用者に着目したLagrange的な解析に基づく情報であるのに対して、後者はこれをEuler的に捉えた群集としての情報ということになる。ここに、群集密度とはフロア面積 1m^2 上に存在する利用者の総数として定義され、計算格子毎に平均化された群集の移動状況を表す情報ということが出来る。

ある利用者に注目したとき、任意の時刻における座標を (x_p, y_p) 、移動速度ベクトルの各方向成分を (u_p, v_p) とすると、 $(u_p, v_p) = V_p \times (\cos \theta_p, \sin \theta_p)$ のように定義される。ここに、 V_p は速度ベクトルの大きさを表し、 θ_p は移動方向とx軸とのなす角を表す。また、時刻 t から微小時間 Δt だけ経過した後の時刻の座標は $(x_p, y_p)|_{t+\Delta t} = (x_p, y_p)|_t + (u_p, v_p) \times \Delta t$ のように書き表される。このため、任意の時刻における V_p ならびに θ_p が与えられれば、利用者の移動を追跡できることになる。

3.2 利用者の移動速度

移動速度ベクトルの大きさ V_p については、注目する利用者がどの計算格子上に存在するかによって異なる。たとえば、混雑の度合いの高い計算格子上にいる利用者の移動速度は小さくなるし、その箇所の浸水がより厳しい状況になれば移動すらできなくなる。まず、浸水の影響のない平常時の移動速度 V_{p0} についてふれる。人間科学あるいは人間工学の分野の研究によれば、歩行速度はこの群集密度の値に応じて大きく変化するとされる⁹⁾。前出の群集密度 ρ が1以下であれば他者の影響を受けることはなく、成人男性の場合 1.3 m/s の速度で移動できると言われている。これを「自由歩行」と呼ぶ。これに対して、 ρ が1を超えると「群集歩行」の状態となり、 V_{p0} と ρ との間には $V_p = 1.3 \times (\rho / \rho_0)^{0.8}$ の関係が成り立つと考えられる。ここに、 $\rho_0 = 1.0$ (person/ m^2) である。このように、利用者の歩行速度は、その瞬間に位置している計算格子の群集密度 ρ の値による。この ρ の値は、すべての利用者の座標が定まれば各計算格子に何人の利用者がいるかが評価できるため、これを求めることができる。

一方、浸水時の歩行速度 V_p については、前述の V_{p0} を基にしてその比 V_p / V_{p0} が単位幅比力の関数として評価できることが示されている^{10)・11)}。そこで、浸水計算により得られた各計算格子における水深と流速の値を用いて単位幅比力を求め、この関数を適用することにより正味の歩行速度 V_p を評価することにした。ここ

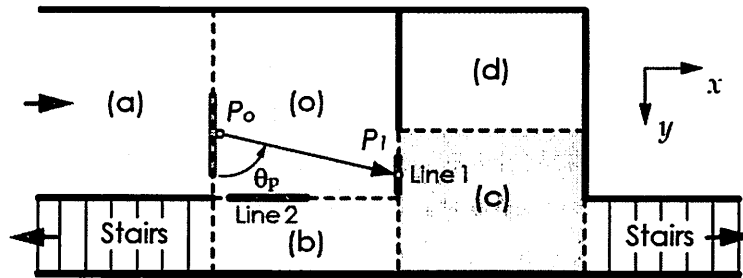


図-2 地下空間のフロアのエリア分割と移動方向角の決定

では、主としてフロア上の取り扱いについて説明したが、階段上での取り扱いについても同様の知見に基づき評価している。

3.3 フロアのエリア分割と移動方向角の決定

個々の利用者の移動方向の決定に関しては次のように考える。図-2にはその概念図を示す。まず、フロア全体を複数の「エリア」に分割する。このエリアは前出のControl volumeを数十から数百の規模でまとめた大きさをもつ。図-2中に(o)ならびに(a)～(d)と記された区画が個々のエリアを表す。個々のエリアは、その中のいずれの地点にいたとしても、平均的な視力があれば全域を見通すことができるように設定される。また、各エリアには、図-2中のLine 1あるいはLine 2のような移動目標点を連ねた線分である「移動目標ライン」が設定されている。利用者はこの線分上のいずれかの点を選んで、その点を目指して移動するものとする。地下空間内の人の移動は、一般に一方向のものではなく、乗車行動・降車行動というように逆向きの流れがあるほか、ある地点では通路が二つに分岐することもある。そのため、各エリアに設定する移動目標ラインは、移動の目的別に必要な数だけ用意される。エリア分割の仕方や、移動目標ラインの設定に当たっては、たとえばパーソントリップ調査の結果などを参考にして、空間内の人の流れを十分理解した上で決定することが重要である。

3.4 利用者の避難開始条件

地下浸水時の避難行動を考えると、利用者が何をきっかけに避難を始めるかということがひとつのポイントとなる。災害時の人間行動に関する様々な分野の研究の成果を参考にして考えると、利用者が自らの判断で避難を開始するのは、主として、(a)利用者がこの空間内に進入してきた水に気づき危険を感じた場合と、(b)避難している他の利用者の動きを見て不安を感じた場合、の二つである。ただし、いずれも被害に遭うかもしれないという危険性に関わる認識を利用者がどの程度もっているかによることは確かである。ここでは、主として通勤・通学の目的で乗り換え行動を行う東京都心部の地下鉄駅を対象に検討を行っており、その認識の度合いは高いと言える。

4. 東京都心部における浸水危険性評価と地下空間からの避難誘導

4.1 対象区域内の概要と解析対象豪雨

この章では、これまでに行われてきた数値解析の結果のうち、皇居を取り巻くように広がる面積約21km²の区域を対象に行われたものを一例として示す。この区域内には東京駅周辺をはじめ日比谷・有楽町・銀座、さらには霞ヶ関・赤坂などがあり、政治・経済・文化のいずれの面から見ても我が国で最も重要な区域といえる。この区域内の土地利用の状況は、皇居や日比谷公園などを除くと空地と呼べるものはなく、一部に住宅密集地はあるものの、そのほとんどが高層ビル群で占められている。また、その間を縫う

ように道路ネットワークが縦横に延びている。この点は、東京に限らず名古屋・大阪などの大都市圏の中心部に共通の特徴と言える。また、この道路の直下には、大小さまざまな下水道がきわめて高密度で敷設されている。対象区域の境界線は、北側を神田川、東側を隅田川、西側を皇居の外堀上にとることとし、南側を溜池幹線下水道集水域の南縁とした。なお、この区域は東京都下水道局の「芝浦処理区」の北東側に位置し、この処理区全体の面積のほぼ1/4程度に相当する。著者らは、この解析とあわせて芝浦処理区全体を対象区域とした数値予測を行っており、その浸水危険性評価を終えたところである。解析手法の一部を修正したほか、下水道のデータベースの不備を改めるなどしたため、この二つの解析の結果は厳密には一致しない。詳しくは今後公表する最新の解析結果を参照するべきであるものの、本質的に大きな違いのないことが確認されている。

この区域には、我が国屈指の大規模地下空間である「丸ノ内の地下空間」があり、大手町駅から東京・二重橋・日比谷・有楽町・銀座の各駅を経て、南東端は東銀座駅までの広大なエリアがひとつにつながっている。また、東京メトロならびに都営地下鉄の全13路線のうち11路線が延びており、互いに複雑に絡み合うように存在している。

この地下鉄駅の中には、たとえば4つの地下鉄路線を立体的に結ぶように広がる地下空間が存在する。そのひとつが溜池交差点付近の下に展開された地下鉄駅であり、ここでは浸水被害が発生したことがある。この駅は、通勤時間帯を中心にかなりの数の利用者が乗り換えをするため、ひとたび浸水が発生すれば深刻な事態になることが懸念される。

東京23区内の浸水危険性を評価するに当たって対象とすべき豪雨をどう捉えるか、という議論は今後に向けて重要であることは言うまでもないが、容易に判断することのできない課題である。本研究では、対象降雨として2005年9月5～6日に東京都杉並区で発生した豪雨データを用いることにした。図-3左側の(a)に示されているのが、実績降雨のハイレートグラフである。これは、当時、杉並区内の下井草地点において観測された10分間雨量の時間変化を表したものである。この豪雨の特徴は、下水道の設計降雨強度である時間雨量50mmを超える雨が140分間にわたって降り続いたことに加えて、わずか10分間で40mmの雨が記録されるなど短時間で見ても猛烈に強い豪雨であったことにある。この雨についてさらによく理解するために、これを2000年に名古屋で発生した東海豪雨と比較しておくことにする。東海豪雨は継続時間が28時間にも及ぶ記録的な豪雨であり、時間雨量が50mm以下にすぎない先行降雨と同様の後続降雨を除き、豪雨の中核となる部分のみ取り出して示したのが図-3右側の(b)である。両者を比較すると、ほぼ同程度の規模であったことがわかる。

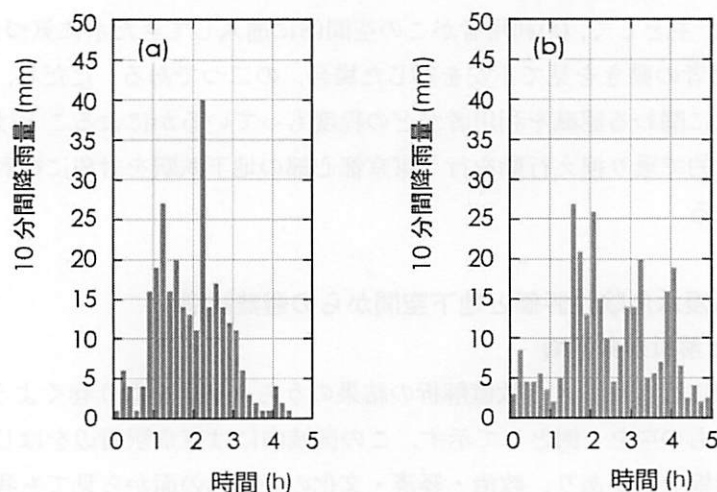


図-3 東京都心部の浸水危険性を評価するに当たって用いた杉並豪雨(2005)と東海豪雨(2000)のハイレートグラフ：(a)杉並区下井草で観測された実績降雨、(b)東海豪雨のコア部分のデータ。

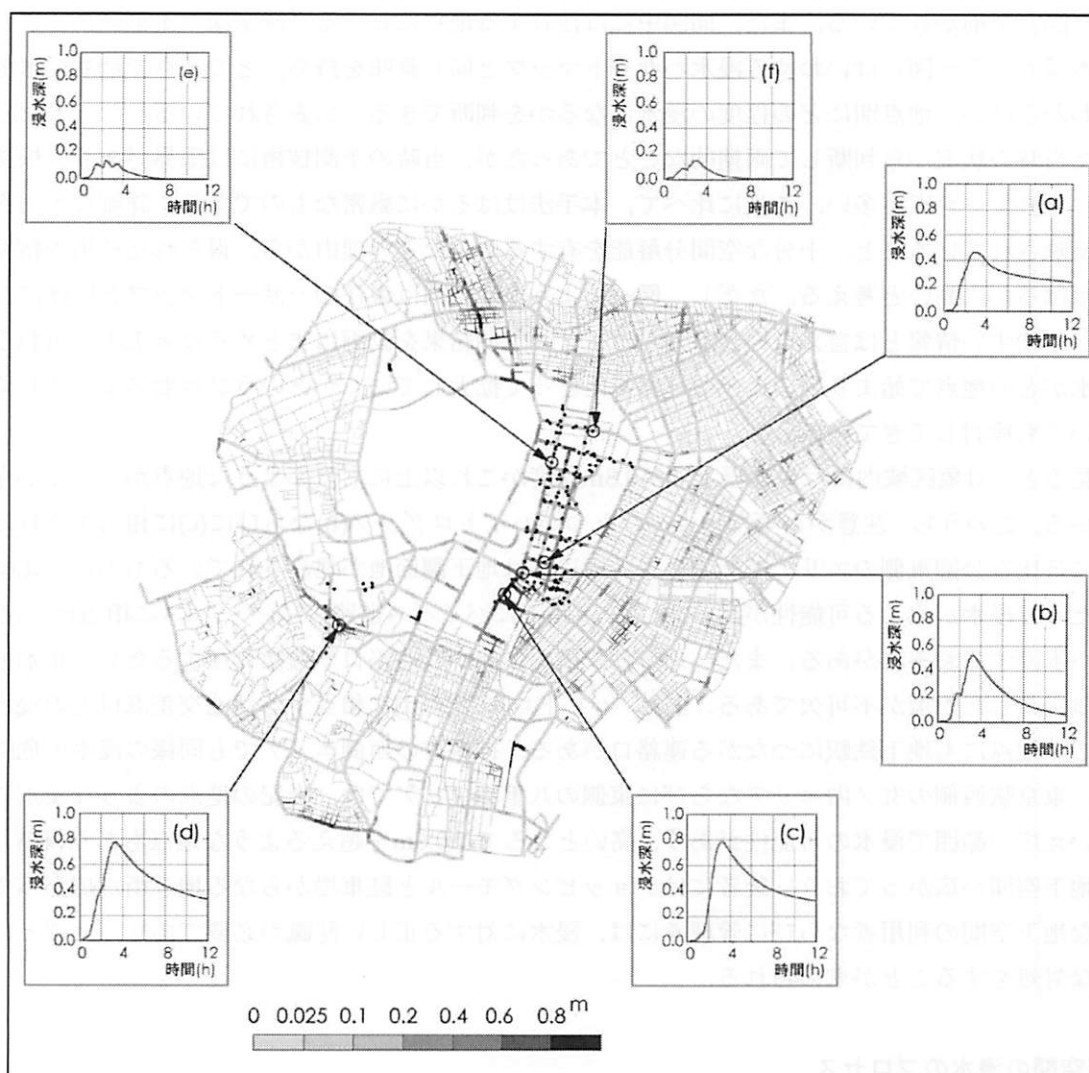


図-4 東京都心部の浸水危険性評価の一例¹²⁾：図の中央には浸水状況が最も深刻になる時刻における浸水深コンター図が示されているほか、注目する6地点における浸水深ハイドログラフも併記されている。なお、図中の「・」は丸ノ内の大規模地下空間ならびに後掲の図-5に示された地下鉄駅につながる地上連絡口の位置を示す。

東京都により公表されている浸水ハザードマップは、この東海豪雨に匹敵する豪雨が将来降ることを想定して作成されたが、2005年の時点でこのような豪雨が神田川の左支川にあたる妙正寺川流域ですでに降っていたことになる。当時、この妙正寺川流域では内水氾濫とあわせて河川からの越水が生じている。なお、これがこの流域で最後に記録された規模の大きな浸水被害である。著者は、東京都心部の浸水危険性を検討する上では、この豪雨を想定降雨とするのがよく、これが区域内に一律に降ったという想定で数値予測を行うことにした。

4.2 豪雨により引き起こされる東京都心部の浸水危険性の評価¹²⁾

ここでは、前述した東京都心部のエリアにおける浸水危険性に関わる数値予測の結果について説明する。この予測計算によれば、各地点における時々刻々の浸水深と流速がすべて計算される。下水道内の水深あるいは水圧や流速もまた計算されているが、この結果について説明することは省略する。図-4にはその結果の一例を示した。この図には、対象エリア全体で捉えたときに浸水状況が最も深刻になる時刻における「浸水

深コンター図」が描かれている。また、同図中には注目する地点における「浸水深ハイドログラフ」も示した。「浸水深コンター図」はいわゆる浸水ハザードマップと同じ意味を持ち、どの地点で最も浸水危険性が高いかがわかるほか、地点別にどの程度の浸水になるかを判断できる。公表されているハザードマップは、作成された当時の状況から判断して画期的なことであったが、当時の予測技術には限界があり、根拠となる計算自体に見直すべき点が多い。これに比べて、本手法ははるかに厳密なものであり、詳細なデータが解析に忠実に反映されていること、十分な空間分解能を有することなどの理由から、得られた結果の精度ならびに信頼性ははるかに高いと考える。ただし、図-4のような静止画は現在のハザードマップと同様に、住民にとってわかりやすい情報とは言えない。著者らは、この予測結果を動画にまとめるなど工夫を重ねることにより、浸水がどの地点で始まりどのような経路をたどって拡大していくかというプロセスまで詳しく伝える技術についても検討してきている。

図-4を見ると、対象区域内には最大浸水深が0.8m程度かこれ以上にも及ぶような地点がいくつか存在することがわかる。このうち、注意が必要な地点のひとつがハイドログラフ(b)ならびに(c)に相当する日比谷交差点ならびに日比谷公園東側のエリアである。この周辺には地下調節池が建設されているものの、比較的広い範囲にわたって浸水が生じる可能性が高い。また、道路下にバイパス道路(アンダーパスに相当)があるため、この部分が水没するおそれがある。また、地下鉄駅構内に向かう連絡口が複数存在するため、止水板の設置などのしっかりした対策が不可欠である。また、ハイドログラフ(d)に相当する溜池交差点付近の浸水も懸念される。この地点にも地下鉄駅につながる連絡口がある。神保町の西側エリアでも同様の浸水の危険性が認められる。東京駅西側の丸ノ内エリアならびに東側の八重洲エリアでは、上記の地点のような浸水にはならないとはいえ広い範囲で浸水の可能性があり、高いところでは0.6mを超えるような地点もあり得る。前者には大規模地下空間が広がっており、後者にはショッピングモールと駐車場からなる地下街が広がっている。このような地下空間の利用者ならびに管理者には、浸水に対する正しい認識が必要であり、いざというときには適切な対処をすることが求められる。

4.3 地下空間の浸水のプロセス

4.2で説明した東京都心部の高度に都市化された区域には、50にも及ぶ地下鉄駅や、これをつなぐように延びる通路を主体とした丸ノ内の大規模地下空間、あるいは八重洲の大規模地下商業施設などが広がっている。図-4のような浸水が発生する事態になると、これらの地下空間にまで水が入り込み、「地下浸水」が発生する可能性がある。ここでは、図-4の地点(d)の道路面下に展開されている地下鉄駅を対象に行った数値予測から、この駅の地下浸水について説明する。これは、地上の浸水と同時に一体的に計算された結果であることに注意されたい。なお、丸ノ内の地下空間についても同様の計算が行われており、十分な対策がとられないとすると、いくつかの地下駅では水没する危険まであることがわかっている。

さて、図-4の基となる予測計算の結果を踏まえて判断すると、対象とする豪雨時にこの地下空間に向かって氾濫水が流れ込む可能性のある連絡口は、わずかに二つだけである。図-5にこの地下空間の構造図を示す。この二つの連絡口とは、図中に白字でNo.5と記された●印、ならびに黒字でNo.1と記された○印の連絡階段の上端に位置するものであり、同一の道路Control volumeに面している。この道路点における浸水深ハイドログラフを図-5右下に併記した。ここでは、止水板の天端高さが道路面よりも0.7mだけ上方(図中の破線の高さ)の位置までくるとし、しかもこの止水板が浸水開始前に設置が完了している、という条件下で行った解析の結果を示す。

図-6の上段に描かれているものが、浸水開始後の各時刻における浸水深コンター図である。この図より、連絡口から流入した氾濫水がどのような移動経路をたどって広がっていくかがわかる。この条件下で浸水が生じる箇所は、この地下空間内の一部に限られることがわかる。なお、この地下空間がかつて実際に浸水したときの浸水の状況はこれとほぼ同等であった。このような浸水状況であれば、利用者は地上に到達しなく

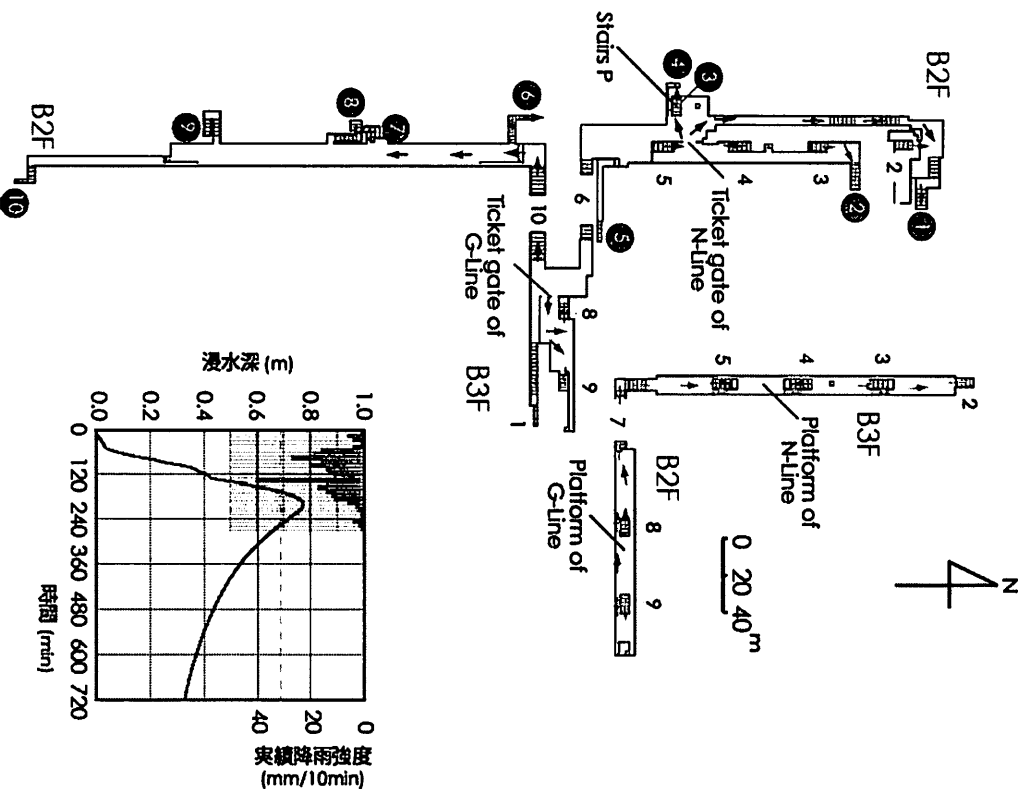


図 5 対象とする地下空間の概要と推奨する避難誘導経路⁹⁾：この地下空間は複層構造になっており，地下2階 (B2F) と地下3階 (B3F) が対象区域である (地下1階は管理区域)．白字の数値が付けられた●印が地上と地下2階とを結ぶ連絡階段であり，黒字の数字が付けられた○印は地下2階と地下3階とを結ぶ階段を表す．ただし，白字のNo.1とNo.2は例外であり，地下2階に達した後にさらに先に進むと，地下6階の別路線のプラットフォームに到る．

ても，図-5の地下2階 (B2F) に相当するG-Lineのプラットフォームか，または同図に示された範囲よりもさらに南側に延びるB2Fの通路上に到達した時点で，すでに十分に安全であることを意味する．なお，浸水が及ばなかった二つのプラットフォームと，地下2階 (B2F) に位置するこの南側通路部分が図-6には省略されている．著者ら¹⁰⁾は，これとは異なる条件下での解析についても行っている．ここでは一例として，事前に止水板の設置を完了することができなかった場合の結果についてだけおられると，浸水の状況は図-6とは明らかに異なるものとなることがわかった¹²⁾．すなわち，図-6の結果によれば，図中に白字でNo.5と記された連絡口から流入した氾濫水が大きく北側に広がることになったが，止水板の設置がない場合には，流入する水の流量が増大するため，氾濫水のフロントはN-Lineの改札口を越えて北に広がり，図-5の構造図の右上に描かれた地下3階 (B3F) のN-Lineのプラットフォーム上に流れ込み，結果的にはここが水没するという結果になった．これは，この地下空間で考えられる最も深刻なシナリオであるといえる．管理者はこのような事態だけは回避できるようなタイミングで，適切な高さの止水板を設置することが求められる．

なお，これに関連して補足説明を加える．図-5の浸水深ハイドログラフを見ると，止水板の天端が道路面

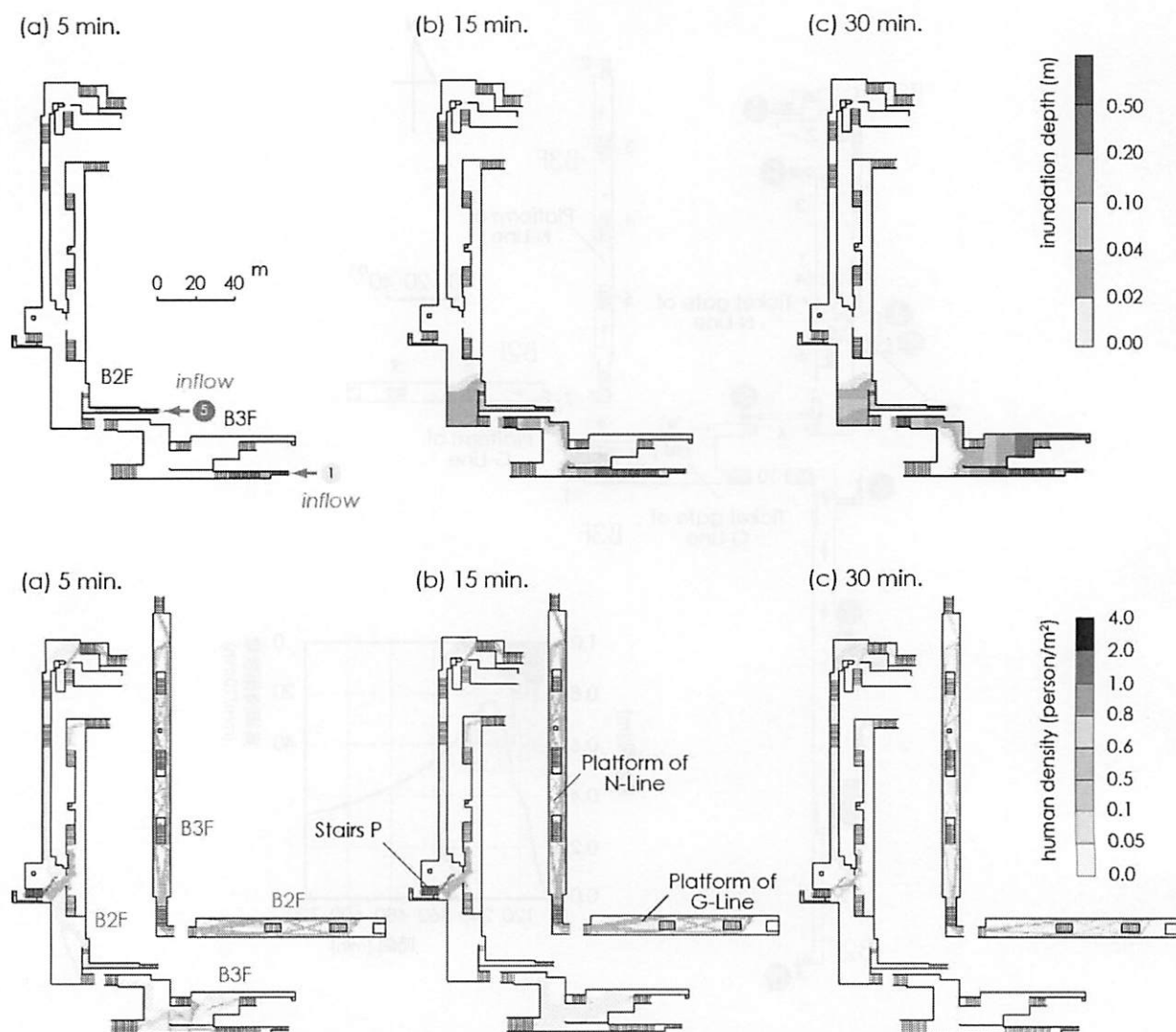


図-6 地下浸水の進行プロセスとそこから利用者の避難誘導に関わる数値解析の結果⁸⁾：上段は、浸水開始後の各時刻における浸水深コンター図を示している。下段は、対応する時刻における利用者の群集密度のコンター図である。フロアならびに階段上の1m²当りに利用者が平均して何人いるかを表すのがこの群集密度である。なお、この図には、氾濫水が到達しなかった二つのプラットフォームが省略されている。

よりも0.8 m以上の高さに来てくようにすれば、地下空間への水の流入を完全に食い止めることができる、というように勘違いしがちである。しかし、それほど単純なものではない。この解析で想定した止水板の設置条件下では、浸水深は確かに0.8m弱に留まっていた。しかし、これは止水板を越えて地下へ水が流入した分だけ道路上の水位上昇が抑制されることによる。一般に、止水板を設置することによって連絡口からの水の流入を遅らせることはできる。しかし、止水板をより高いものに代えると、その周辺の道路上の水位が上昇することになり、当該の連絡口からの流入を防ぐことはできるかもしれないが、その一方で、水が入り込むはずのない別の連絡口からの流入を誘発する可能性がある。止水板の設置箇所やその高さを決定する際には、図-4ならびに図-6のような解析結果が一つの参考となるが、解析とは異なる条件下で止水板の設置について考える際には、上記のような点に注意する必要がある。

4.4 地下空間からの利用者の避難誘導⁸⁾

ここでは、4.3で説明した地下浸水時の利用者の避難誘導について説明する。3.で説明した避難行動解析手

法を適用した数値実験を繰り返すことにより、この浸水時に望ましい避難経路を見いだすことができる。本研究では、エリア毎の避難目標ラインの設定を変更しながら避難行動解析を繰り返した。その結果として、図-6上段のような浸水となる場合に最適な「避難誘導経路」は、前掲の図-5の構造図中に矢印で示されたようなものとなると判断された。この経路を選定するに当たっては次のことに留意した。すなわち、(a) 図-5の上方に位置する白字のNo.1またはNo.2の階段を経由して、浸水の及ぶことのない別路線(C線)のプラットフォームに向けて利用者の一部を誘導させ、そこから地上へと避難させる。(b) 地下2階の南側通路部分には同じく浸水の危険がないため、地下3階に位置するG線改札口付近の利用者をこの通路部分へと誘導する。この地下空間の場合には、図-5中に「Stairs P」と記された白字のNo.3の階段を通じて多くの利用者が出入りしている。浸水時にもこの階段上で過度の混雑が発生する可能性が高く、将棋倒しなどの二次災害が懸念される。前述の(a)と(b)の誘導は、浸水区域に近寄ることなく、しかも利用者が集中する可能性の高いこの階段での混雑度を緩和することをねらったものである。

図-6の下段には、このような避難誘導を行った場合の群集密度のコンター図が示されている。ここには、記載の各時刻から5分間にわたっての群集密度の平均値が用いられている。ここに、群集密度が0.10の状態とは、床面積1m²のフロア上に存在する利用者が5分間の平均値で0.10人であったことを意味する。なお、この図にもB2Fの南側通路部分が省略されている。実際には、この部分の避難行動解析も同時に行っているが、図-5中の黒字のNo.10の印の階段を左方(西側)に上り切ってこの部分に到達した時点で難を逃れたことになるため、ここでは結果を示すことを省略した。この点に注意されたい。群集としての利用者の移動は、群集密度の高い箇所を辿るように生じていたことになるため、図-6下段のコンター図より、避難誘導時によってどのような移動になっていたかが理解できる。また、この図より避難経路に沿って誘導を行うと、群集密度が2を超えるような箇所はほとんど現れないことも確認できる。このことは、大きな混雑を引き起こすことなく、避難がスムーズに進んだことを意味している。

図-5の避難誘導経路は、図-4のような規模の地下浸水が生じる場合に見いだされたものである。しかし、4.3で説明した止水板の設置が間に合わない場合や、今後さらに高強度の豪雨が発生する場合には、浸水の規模は図-5上段のものとは異なるものとなる。その場合には、すでに説明した浸水予測計算と避難行動解析とを組み合わせることで計算することにより、必要となる新たな望ましい避難誘導経路を見いだすことができるのは言うまでもない。

浸水時に避難誘導を速やかに完了させる手段として、「避難を促すアナウンスを流す」という選択肢がある。最後に、これについてふれる。避難行動解析手法を用いて同様の検討を行ったところ、避難を促すアナウンスは短時間で避難を開始させることができるという点で極めて有効であることがわかった。しかし、一斉に避難行動が始まってしまう傾向にあるため、特定の階段に利用者が殺到して過度の混雑を招くことにもつながりかねない。そのため、利用者の避難がある程度完了した時刻を選んでアナウンスを行うのが効果的との結論が得られている⁹⁾。かなりの数の利用者が空間内に留まっている時間帯にはアナウンスを行わないようにすべきである。

5. 東京東部低平地を対象とした外水氾濫予測への適用¹³⁾

この章では、東京東部に広がる「荒川と隅田川ではさまれた低地(ここではこれを東京東部低平地と呼ぶ)」の浸水危険性についてふれる。ここでは、巨大災害につながるおそれの高い事例、すなわち荒川からの越水が生じた場合に発生する外水氾濫に焦点を絞って行った浸水・氾濫の数値予測の結果について説明する。

対象区域の概要は以下の通りである。まず、境界については次のように定めた。東側および北側を荒川、西側を隅田川により区切り、南側の境界線を埋立地の間を通る運河上におく。その地表総面積は約42km²であり、これは東京都下水道局の「砂町処理区」に相当する。この地域の地形上の特徴は、全般的に標高が低いほか、東側半分ほどの区域では海拔マイナス2～4 mにも及ぶことにある。この東部低平地の浸水・氾濫に

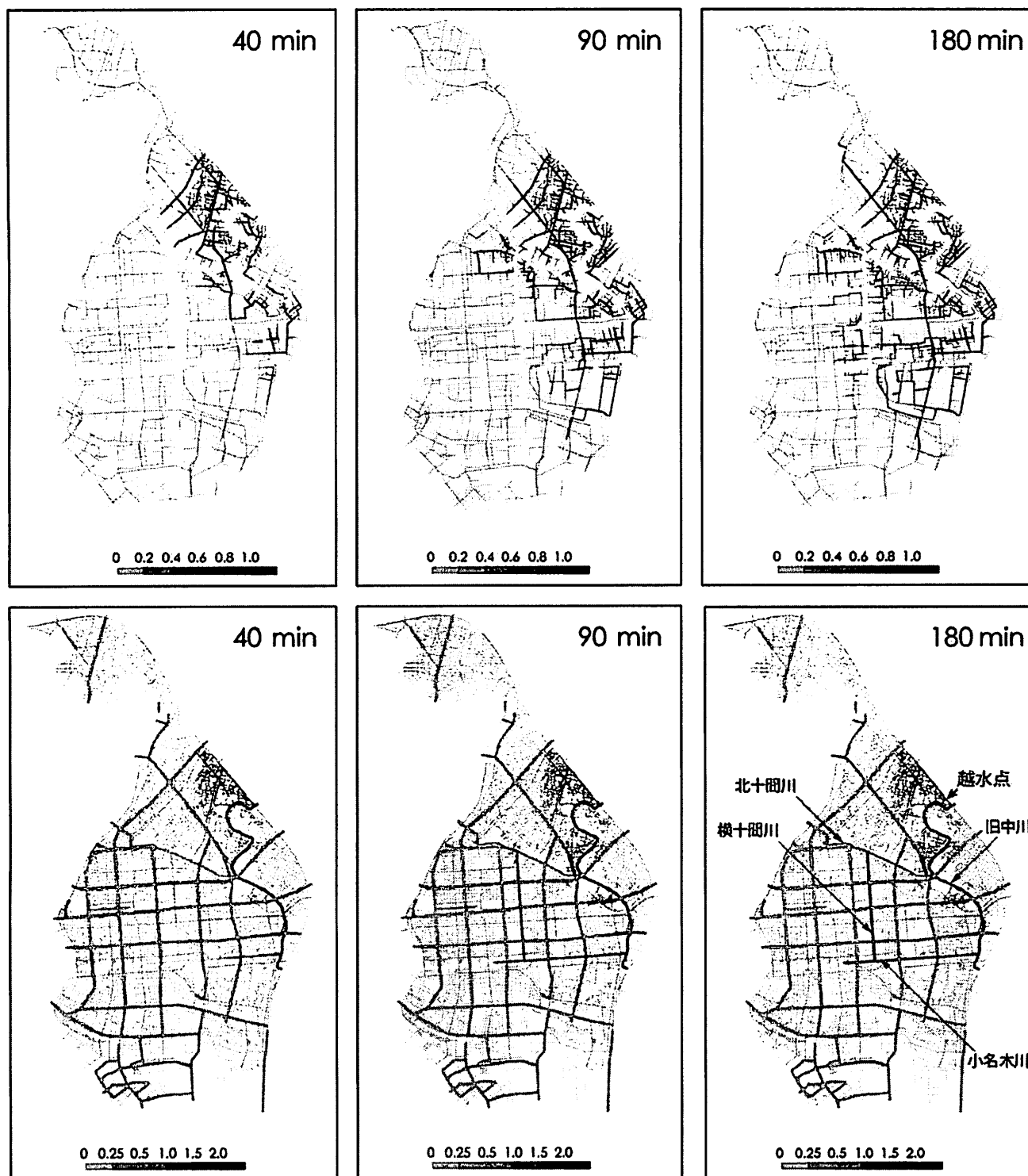


図-7 東京東部低平地を対象とした荒川越水時の外水氾濫解析の結果¹³⁾：上段は下水道内の満管率のコンター図を、下段は道路上の浸水深コンター図を表す。

について考える上で、「江東内部河川」が果たしている役割は極めて重要である。内部河川は互いに接続する4本の河川からなる。このうち、北十間川と小名木川はこの区域内を東西に延びており、途中に設置されている北十間樋門あるいは扇橋閘門によって仕切られている。そのため、東側区間は、隅田川と直接つながる西側河川とは切り離されている。また、横十間川はこの北十間川と小名木川とを南北に結んでいる。同じく南北に延びる旧中川は、その北端と南端に木下川排水機場と小名木川排水機場があり、これにより荒川と切り

離されている。また、この旧中川は、西側から延びる北十間川と小名木川につながっている。このように江東内部河川は隅田川ならびに荒川とは分離され、独立の水路群となっている。ただし、ポンプ場を介して下水道ネットワークと直接つながっているため、この区域から運ばれてきた雨水の多くはこの内部河川に排出され、最終的には上記の排水機場を経て荒川に運び出されるようになっている。

ここでは、一つの事例として、河口から約7.5km地点の荒川の右岸堤防（図-7中の矢印で示された地点）を越えて流量 $1000\text{m}^3/\text{s}$ の水が堤内地側に流入するという条件下で行った解析の結果について説明する。この越水想定地点は、旧中川が荒川に接する排水機場の位置のわずかに上流側にあたり、周囲に比べて堤防がわずかに低い。また、対象とした越流流量は、荒川で「200年に一度の頻度で発生する洪水」の流量 $14,000\text{m}^3/\text{s}$ の7%程度に相当し、今後これまでにない規模の豪雨が関東平野を襲うとすると、実際に発生する可能性は小さくないと見ている。なお、この解析では、旧中川の南北端に位置する二つの排水機場からの荒川への排水が不可能であるとの想定で計算した。

図-7は、このような条件下で行われた外水氾濫の数値予測の結果である。ここには、越水が始まってから3時間後までの結果がまとめられている。図の上段には下水道満管率のコンター図が、下段には道路上の浸水深コンター図がそれぞれ示されており、左から順に、越水が始まってから40分、90分ならびに180分後の結果となっている。下水道満管率とは、下水道の各区間に存在する水の体積をその容積で除した比率を表しており、これが1となっている区間では満管状態の流れが生じていることを意味する。図の下段には内部河川の水深コンター図も併記されており、赤色(モノクロでは最も濃い色)で示されている区間では堤防を越えるほどの水位になっていることを意味している。この解析結果から、この条件下で生じる浸水域拡大プロセスは次のようにまとめることができる。

- (1) 氾濫水は、越水地点の南側に位置する旧中川に入り込み、相互につながった内部河川の中を伝搬するように流れていく。河川水位は、時間の経過とともに上昇し、旧中川の水が堤防を越えて最初に南側に流れ出すのは越水開始から30分後であった。
- (2) 越水開始から40分後には北十間川からも水が南側に溢れ出す。この氾濫水は両河川の南側にある下水道の中に流れ込み、管路内を流れてさらに南に向けて輸送される。
- (3) 90分後には内部河川内の水位がほぼ全区間にわたって満杯に近い状態となり、180分後には横十間川から西側に向けた越水が顕著になる。
- (4) 下水道ネットワーク内に流れ込んだ水は、道路上の氾濫水の伝搬よりもはるかに早く遠方にまで達する。さらに管内の圧力が局部的に高まる地点では、雨水ますを経由して下水管内の水が地上に逆流する。このように内水氾濫と同じメカニズムによってスポット的に浸水が発生し、その地点がつながるようにして浸水域が拡大していくことになる。

今後、ここで想定したものよりも規模の大きな越水が荒川から生じることになれば、その被害は計り知れないものとなる。ただし、対象区域には大口径の幹線下水道が複数敷設されており、下水道による貯留能力も高い。このような浸水・氾濫を予測する場合には、下水道のこのような効果を十分かつ適切に評価しながら計算しないと、浸水のプロセスならびに規模を正確に評価することはできない。このことに注意を要する。

6. おわりに

本稿では、東京都心部のような高度に都市化された区域が豪雨に襲われた場合に生じる「都市浸水」と、荒川からの越水に伴い生じる「大規模浸水」を検討の対象とし、これに対して適用可能な数値予測手法について説明した。前者の場合に最も深刻な被害が発生するのは地下空間であることから、「地下浸水」をも同時に計算することができる予測手法となっている。この予測手法は、実際の都市インフラに関わる情報をすべて入力して行うものであり、従来になく精緻なものと言える。また、解析例からわかるとおり、この手法を適用することにより対象区域内の各地点における浸水危険性の評価はもちろんのこと、点在する地下鉄駅や大規

模地下空間の浸水危険性をもそのプロセスとともに明らかにすることができる。

また、地下空間の浸水被害を軽減するための対策としては、これだけでは十分とは言えない。豪雨時にたとえば止水板の設置に手間取り、対応に遅れが出ることが考えられる。そのような場合に、利用者がパニックを起こして無秩序な行動をとれば、たとえば階段で将棋倒しが起こるなどして人的被害が出ることもあり得る。浸水が懸念される地下空間の場合には浸水予測の結果に基づき、いかなる危険が潜んでいるかを認識した上で、適切な避難誘導について検討しておくことが望まれる。このためのツールとして利用者の避難行動解析手法が開発されている。地下浸水時には秩序立った避難誘導を実現することが重要であり、これにより被害を最小化できるものと信じる。

現在は、公表されている都内の浸水ハザードマップに代わる有効な「浸水危険度情報」をまとめ上げることとあわせて、リアルタイムで予報結果を広く周知するシステムについて検討している。これが実用化されれば「〇分後に△△の交差点が通行不能となるため、たとえば緊急車両の通行に当たっては、この交差点を避けた別のルートを選んで運行させるべきである」といった車両の誘導もまた可能となる。今後は、このような技術あるいは予測ツールが実務に取り入れられ、浸水被害軽減に向けて有効に活用されることを期待する。

謝辞：本稿は著者がこれまで進めてきた研究の成果を再構成したものである。これらの研究は、当時学生であった大野龍馬君・佐藤裕隆君・和田祐樹君・竹 順哉君・浅井晃一君・池田 遼君・古木 雄君らによる精力的な活動により支えられ完成をみました。また、東京都建設局河川部ならびに同下水道局ならびに東京地下鉄株式会社の関係各位には、関連情報の提供をいただくとともに有益な意見交換をさせていただきました。ここに記して深甚の謝意を表します。

引用文献

- 1) 池内幸二・越智繁雄・安田吾郎・岡村次郎・青野正志：大規模水害時における地下鉄等の浸水想定と被害軽減方策の効果分析，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.68，No.3，pp.136-147，2012.
- 2) 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，pp. 70-85，2011.
- 3) 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，I_997-I_1002，2012.
- 4) 間島真嗣，戸田圭一，大八木亮，井上和也：都市域の地上・地下空間を統合した浸水解析，水工学論文集，第49巻，pp.601-606，2005.
- 5) 武田 誠，森田 豊，松尾直規：下水道システムを考慮した氾濫解析の治水対策への適用，水工学論文集，第51巻，pp.529-534，2007.
- 6) 川池健司，中川 一，今井洋兵：都市域の雨水排除過程に着目した内水氾濫解析モデル，水工学論文集，第53巻，pp.817-822，2009.
- 7) 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.
- 8) 関根正人，大野龍馬：集中豪雨により発生する地下空間の浸水と利用者の避難誘導に関する数値解析，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol. 69，No.1，pp. 30-43，2013.
- 9) 岡田光正：群集安全工学，鹿島出版会，2011.
- 10) 石垣泰輔，戸田圭一，馬場康之，井上和也，中川 一：実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討，水工学論文集，第50巻，pp.583-588，2006.
- 11) 浅井良純，石垣泰輔，馬場康之，戸田圭一：高齢者を含めた地下空間浸水時における避難経路の安全性に

関する検討, 水工学論文集, 第53巻, pp.859-864, 2009.

- 12) 関根正人, 竹 順哉: 地下空間を抱える東京都心部を対象とした内水氾濫ならびに地下浸水の数値解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 69, No. 4, I_1567-I_1572, 2013.
- 13) 関根正人, 池田 遼: 東京東部低平地を対象とした浸水・氾濫の数値予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 70, No. 4, I_1429-I_1434, 2014.