

水工学シリーズ 10-A-5

集中豪雨に伴い発生する
東京都心部の内水氾濫とその数値予測

早稲田大学 理工学術院 教授

創造理工学部 社会環境工学科

関根 正人

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2010年8月

集中豪雨に伴い発生する東京都心部の内水氾濫とその数値予測

Numerical Prediction of Inundation caused by a Localized Torrential Rain in highly-urbanized Area in Tokyo

関 根 正 人

Masato SEKINE

1. はじめに

地球規模の気候変動と都市特有の問題であるヒートアイランド現象の双方の影響もあって、近年、都市では極端に規模の大きな豪雨に見舞われるようになってきた。著者が検討を続けてきている東京都23区内の地域もその影響を強く受けていると判断され、このところ憂慮すべき被災事例が少なくない^{1),2)}。具体的には、1999年8月に発生した集中豪雨時の地下鉄渋谷駅ならびに溜池山王駅の浸水、2005年9月の神田川流域の浸水や、2008年8月に雑司ヶ谷幹線下水道において発生した水難事故などを例として挙げることができる。東京の都心部や神田川をはじめとした都市河川の流域には、時間50mmを計画降雨として、下水道と都市河川とからなる「雨水排除システム」が完備されている。この下水道に関しては通常規模のものに加えて、これを補完するように幹線下水道も配備されている。また、都市河川には地下調節地に代表されるような貯留施設の整備も進んでおり、この規模の降雨に対しては十分に処理可能な段階にあるものと考えられる。ただし、これで万全というわけでもない。近年、時間雨量100mmを超える雨に見舞われることが稀ではなくなってきているという現実があるためであり、これが大きな懸念材料となっている。また、雨水を受ける地表には都市化された今でも自然の地形的な凹凸があり、谷状の地形や局地的な凹部あるいは窪地がそのまま残されている。このようないわば「地形的な弱点」ともいえる区域では、そこに向かって周囲から水が集まる傾向があり、その量が下水道の排水能力を超えると地表面上に水が取り残されることになる。このようにして生じる「内水氾濫」を完全になくすことは事実上不可能であろう。さらに、もしこのような地点に地下空間へとつながる連絡階段が存在する場合には、氾濫水がここを通じて地下空間へと流れ込む可能性がある。地表面上に「内水氾濫」が生じた場合に最も大きな被害が予想されるのがこの地下空間である。都心部では、近くに河川がないからといって安全というわけではなく、河川からの越水を伴う「外水氾濫」に比べて浸水深は小さいものの、人命に関わる深刻な事態にまで発展する可能性があるということに注意を要する。

このような状況を踏まえて、東京の都心部や都市河川の流域では、内水ならびに外水氾濫を想定したハザードマップが作成・公表されているが、これだけでは十分とはいえない。行政ならびに研究者は、今後速やかに次のような検討を完了する必要がある。すなわち (1) 具体的にどこに浸水あるいは氾濫の危険が潜んでいるのか、また、その浸水区域が拡大する過程で氾濫した水がどのような経路をたどるのかといった点を可能な限り高い空間分解能でもって把握すること、(2) この情報を住民にしっかりと伝えた上で、住民がこの浸水危険性を自らの問題として認識し、いざというときの行動がとれるようにすること、(3) 集中豪雨の数値予報と連動した浸水・氾濫予報を可能とするような的確でかつ理に適ったシステムを開発すること、などである。著者は、このような認識のもとにこの10年にわたって、東京都23区内の地域を対象とした浸水危険性の評価と、地下浸水が懸念される大規模地下空間の選別とその浸水プロセスの把握、さらには浸水した地下空間からの避難に関わる検討、などを進めてきたが、その目的は上記にとおりである。本稿では、これらの研究成果の一部を紹介しながら、東京都心部で発生が予想される内水氾濫とこれに伴う地下浸水について説明

する。ここでは、この分野の研究の最前線についてふれるように努めたが、多くのことを網羅するような説明はむしろ焦点の絞りきれない散漫なものとなる恐れがあると考えた。そこで、ここではこれを避けるため、著者自らの研究成果に絞って説明することにし、他の研究者の成果については第2章に概説するにとどめた。

2. 都市域における浸水・氾濫解析に関わる既往研究

都市の内水あるいは外水氾濫に関わる研究は、この10年ほどの間に精力的に進められてきた。そして、浸水・氾濫に関わる解析技術は飛躍的な進歩を遂げてきたといえることができる。この間、このテーマに携わる研究グループがほとんど増えることはなく、限られた数の研究者がその牽引役を担ってきた。これらの解析の骨子は、(a) 地表面上の氾濫水の流れに関する計算、(b) 下水道内の流れに関する計算、(c) 道路面と下水道との間の水のやりとりに関する計算、(d) 河川における流れの計算、の4点に整理することができる。河川に面した地点では、(e) 河川と道路面あるいは河川と下水道との間の水のやりとり、がこれに加わる。さらに、対象とする区域の真下に地下空間があり、そこへとつながる連絡階段の入口が道路(厳密には車道横の歩道)面上に設けられている場合には、(e) 地下空間内への水の流入とそれに伴う浸水に関わる計算、も合わせて行うことが必要となる。

都市化された地域を対象として行われた浸水あるいは氾濫に関わる数値解析的研究の代表例としては、次のようなもの^{3), 4), 5), 6), 7), 8)}を挙げることができる。これらはあくまでも代表的な論文に過ぎず、研究グループ毎に特筆すべき一連の研究成果があることに注意を要する。これらの研究で対象とされてきた地域には、そこにどのくらい空地が残されているのか、どの程度密に下水道が整備されているのか、といった都市化の程度に大きな違いがある。高度に都市化された東京都23区内の地域は、この点で特異な存在であるといえる。このこともあって、地表面上の氾濫水の流れの解析と、道路面と下水道との間の水交換(下水道への氾濫水の取り込みあるいは下水道からの逆流)の取り扱いには違いが見られ、第3章で説明する著者らの解析方法と上記^{3), 4), 5), 6), 7)}のものとは本質的に異なる。こうした観点から既往研究をまとめておくことにする。

まず、地表面上の氾濫解析については、著者らの解析を除くすべてのものが浅水流方程式に依拠した平面二次元解析である。平面二次元解析の場合には、対象区域内を非構造格子網で覆い尽くし、この上の流れを運動方程式と連続式に基づき解くことになる。都市化された地域は、道路あるいは「街路」と、これにより囲まれた「街区」とに分けることができる。しかし、この解析の場合には、「街区」と「道路」とを明確に区別することはせず、それぞれの計算メッシュ毎に異なる流水抵抗を与えることで、結果的に主な流れが道路上に現れるようにしている。このような解析は、どちらかといえば空地の占有比率の高い地域の解析に適した方法と捉えることができる。一方、著者らの解析は東京都心部のように高度に都市化された区域を対象としたものであり、地表面上の氾濫水の流れは道路面上に限られるという前提に立っている。そのため、この解析では実在するすべての道路ネットワークをコンピュータ上に再現し、最低でも交差点毎の空間分解能を確保しつつその流れを解くことになる。これは、対象とする地域が他の研究で対象とされたものに比べて建物の密集の度合いが高く、空地と呼べるものが無視しうるくらい少ないことを考慮したためである。氾濫水が街区の中にまで入り込むことはないという近似できる場合には、この解析こそが計算効率に優れた有効な方法といえる。ただし、この場合には街区に降った雨の取り扱いが重要となる。これについては、第3章で説明する。

次に、下水道内の流れに関する解析についてまとめておく。下水道の整備状況は地域によって大きく異なり、同じ都市と称される地域であってもかなり密にネットワークが組まれているところから、ネットワークというには粗な状況に止まっているものまで様々な段階がある。このことは、地表面上で生じる浸水あるいは氾濫に関わる数値解析を行う場合に、そこに存在する下水道の効果をどの程度正確に反映させればよいか

という判断が、対象とする地域の都市化の状況によって異なることを意味している。東京都23区には、これ以上は難しいほど密に下水道が敷設され、建物のひとつひとつがこれにつながるような構造となっている。そのため、このような地域の場合には、実際に存在する下水道についての情報を取り込み、これを忠実に解析に反映させることが必要となる。その際、道路面上の氾濫水が下水道へ入り込むプロセスあるいは下水道から道路面上への逆流が生じるプロセスをいかに合理的に取り扱うかが鍵となる。東京都心部には道路側方に「雨水ます」が設置されており、上記のような水のやりとりはこれを介して行われるよう設計されている。関根ら⁹⁾はこの雨水ますにおける水のやりとりを水理学的に無理なく評価する方法を考案しており、数値解析にはこれが導入されている。便宜的にマンホールを介してこのやりとりを評価してきた他の研究とはこの点で大きく異なる。

最後に、地下空間の浸水について簡単にふれておく。大規模地下街や地下鉄駅は、道路からのアクセスを優先して地下へとつながる連絡階段が歩道上に複数設置されているが、その位置の選定に当たってその地域の浸水の可能性をどれほど検討したかは定かではない。最近になって連絡階段の入口に止水版や土嚢を設置する必要のあることが認識されるようになったが、これらをどのタイミングで設置するかは管理者の判断によることから、地下浸水の危険性をゼロにすることは不可能といえる。このような現状から、(1)どの程度の規模の降雨に対してどの連絡階段から水が入り込む可能性があるのかについて、地下空間毎に検討する必要があり、そのための解析手法を用意しておくことが求められる。また、(2)水が流入した場合にどのような経路をたどって地下空間内を広がっていくのかを知り、これに対して最適な避難が可能となるような誘導方法について検討しておくことが望まれる。こうした点に鑑み、近年、この地下浸水に関わる研究も活発に進められてきている。具体的には、浸水そのものに関わる地下空間模型を用いた水理学的実験¹⁰⁾や、実在する地下空間を対象としてその浸水過程を数値計算により明らかにするための研究^{8), 11), 12), 13), 14)}などがなされており、かなりの知見の蓄積も進んでいる。また、浸水時に地下空間から避難することを想定した研究も行われている。たとえば実物大模型を用いた浸水時の歩行困難度に関わる実験的研究^{15), 16), 17)}もなされ、その成果は研究者のみならず広く知られるようになってきた。また、地下空間からの避難行動を数値模擬する技術に関わる研究¹⁸⁾や、実際の地下空間からの避難誘導に関わる数値解析手法の開発ならびにこれを用いた避難誘導経路の検討なども進められてきた^{19), 20)}。

3. 東京都心部を対象とした街路ネットワーク氾濫解析モデル

3.1 解析モデルの概要

この章では、著者らにより開発されてきた「街路ネットワーク氾濫解析モデル」の概要について説明する。図-1にはこの解析モデルの概念図が示されている。東京都心部ならびにその周辺の地域には、かなり高い密度で道路がひかれており、網の目状のネットワークが構成されている。第4章ならびに第5章で説明する解析で対象となった地域の場合には、地表面積に占める道路の総面積の比は30%かそれ以上ということができる。東京都23区の場合には、道路で囲まれた区域である「街区」は (a) 高層ビル群が林立する区域、(b) 住宅密集区域、(c) 公園や墓地・霊園などの空地、のいずれかとなる。このうち、東京新宿、渋谷をはじめとした商業地域や、第5章で説明する地下鉄溜池山王駅付近など都の中心に位置する地域には、住宅地ならびに空地(すなわち(b)ならびに(c))はほとんど見られず、すべてが(a)であると見なすことができる。一方、2005年9月ならびに2008年8月に集中豪雨を受けた妙正寺川流域や豊島区雑司が谷周辺の地域の場合には、鉄道駅を中心に(a)の区域があるもののほとんどは(b)の住宅密集区域であり、(c)の空地はほとんどないに等しい。これについては第4章で説明する。以上のような状況にある地域が集中豪雨に見舞われた場合に、どのような経路をたどって浸水域が広がっていくと考えるべきであろうか。上記の住宅密集地域の場合、その建ぺい率は60%

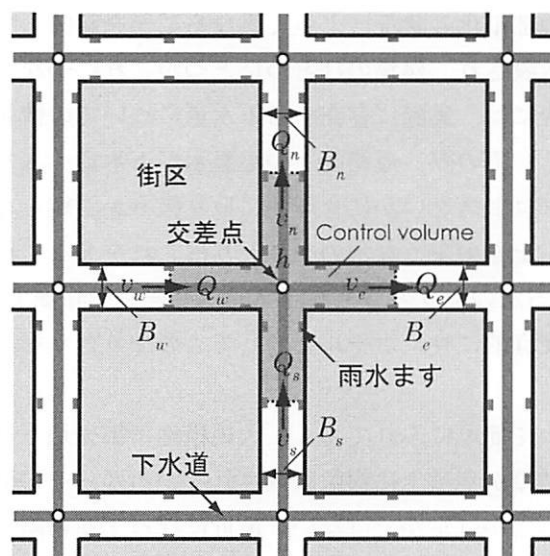


図-1 街路ネットワーク氾濫解析モデルの概念図：道路に囲まれた淡いグレーの区域が「街区」であり、この部分が高層ビル群、住宅地あるいは空地に相当する。図の中央の濃いグレーに着色された部分が道路上の流れを解析する際の Control volume である。道路中央に描かれた太い実線は道路面下に敷設された下水道を表し、道路側方に位置する長方形が雨水ますを表している。

かそれ以上であり、そのスペースのほとんどが建物で埋め尽くされ、庭などの建物以外のスペースはわずかなしかないのが実情である。また、都市河川に沿うように帯状に広がる標高の低い区域を除けば、建物間をぬうような流れが生じるほどの大水深となることは考えにくい。このような状況から、氾濫水の移動経路は実質的に道路上に限定され、氾濫水は道路ネットワーク上を標高の低い地点を目指して流下すると考えるのが自然であり、このように取り扱うことが現実に近いと判断される。著者らが、平面二次元解析ではなく「街路ネットワーク・モデル」と呼ばれる手法を用いて都心部の浸水・氾濫解析を進めてきた理由はこの点にある。

街路ネットワーク・モデルを適用する場合には、街区に降った雨の取り扱いが重要となる。街区が前述の(a)に相当するような高層ビル群に占有されている場合には、街区に降った雨のほとんどが建物内に一時貯留され、十分な時間遅れをもって下水道に流出すると考えられるため、少なくとも集中豪雨に関しては、これを無視して解析を行ったとしても十分に意義ある結果は得られると判断している。ただし、台風に伴う比較的長期にわたる雨の場合には、この限りではない。一方、街区が(b)の住宅密集地である場合には、ここに降った雨を無視することはできない。これらの雨は、建物の屋根から軒樋を経て、直ちに下水道へ流入するように設計されているからである。著者は、この住宅地から下水道への雨水流出プロセスを保存則や水理学的な関係のみに基づいて捉えることを目指しており、より精緻な取り扱いとなるよう段階的に研究を発展させてきている。このうち、本稿では最も簡便な取り扱いについてふれるとともに、これに基づく解析結果を示す。

3.2 道路面上の氾濫水の流れに関する解析

図-2には、一例として4.2において説明する妙正寺川流域を対象とした解析に用いた道路ネットワーク図(同図(a))ならびに下水道ネットワーク図(同図(b))を示した。この道路ネットワーク図には合計で20235の計算点がとられており、これらは主として交差点に相当する。本解析では、隣り合うすべての計算点を結ぶ

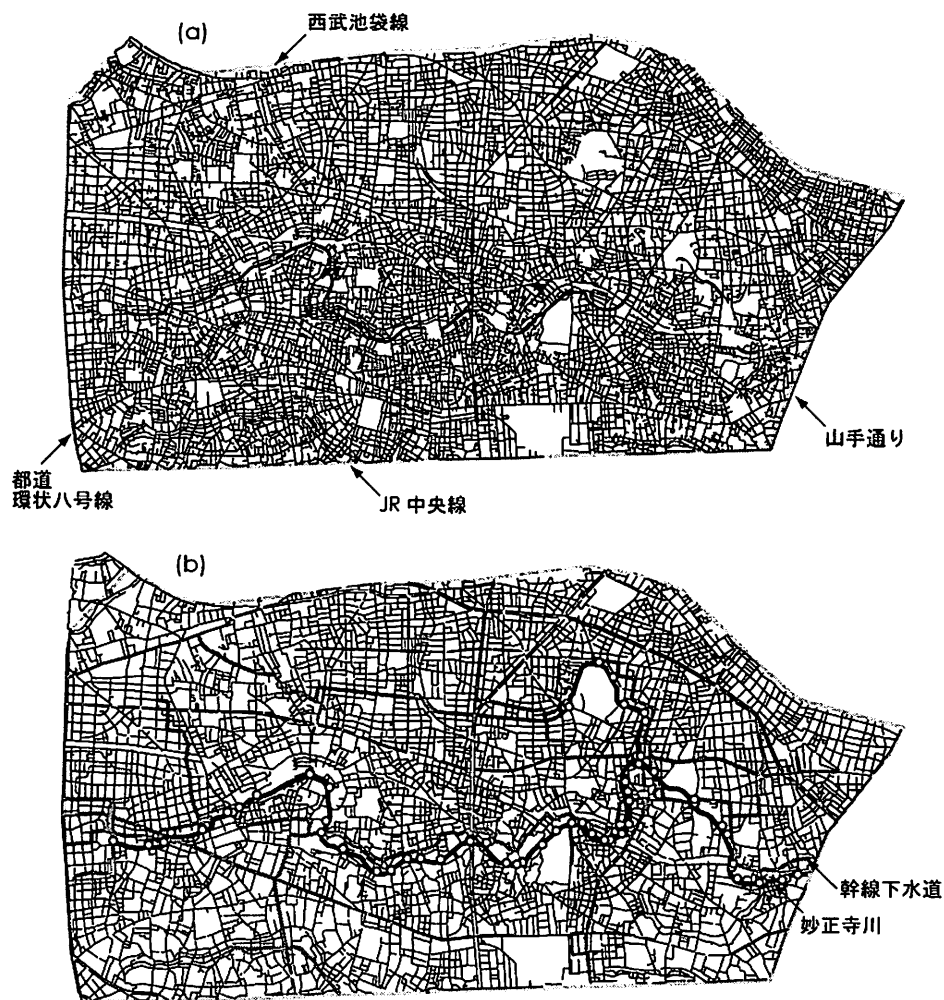


図-2 妙正寺川流域を対象とした解析に用いられた道路ネットワーク図ならびに下水道ネットワーク図：(a) 道路ネットワーク図，(b) 下水道ネットワーク図。(b)には幹線下水道を淡い太線で示してある。また，同図の中央の濃い太線が妙正寺川ならびにその支川の江古田川を表し，この河川に沿って示された○印が下水道と河川とを結ぶ「雨水吐」を示す。

中立二等分線上に境界面を設定し，これにより区切られた道路区域をControl volumeとした．そして，連続式に基づきその平均水深を計算し，運動方程式に基づきその境界面を通過する流れの速度を計算する．なお，計算の簡略化のため，運動方程式における移流項を無視している．解析に先立ち「国土地理院発行の縮尺1/2500地形図」から各交差点間の距離と道路幅のデータを，「数値地図5mメッシュ(標高)」から交差点の標高データを求め，これらに関するデータベースを作成した上で数値解析を行う．

3.3 下水道内の流れの解析

下水道内の流れに関しては，たとえば図-2(b)のような下水道ネットワーク図を作成し，これに基づき計算する．妙正寺川流域の場合の下水道計算点の総数は11373である．この流れの解析は，基本的には道路上のものと同様の方法により行われ，下水道計算点(マンホールに相当)を中心としたControl volumeを定義して考える．下水道内には，通常「開水路流れ」が生じているが，雨水の集中が進んで満管状態になると「管路流れ」となる区間が現れることになる．このように下水道内に両者の流れが混在するようになると，その流れを厳密に解くことは容易ではなくなる．このような流れの解析には，スロットモデルと呼ばれる考え方²⁾が

適用されることが多く、近似的な取り扱いながら概ね現象を再現しうるものと考えられている。ここでもこの考え方を導入する。この解析に当たっては、下水道台帳から管路の長さ・管径・管路結節点の標高などの情報が得られるため、これを基に下水道ネットワークに関わる詳細なデータベースを作成し解析を行う。

この解析を行う上で重要となるのが、「道路上に降り注いだ雨水を下水道内に取り込むプロセス」ならびにこの逆の「下水道内の水が地表面上に逆流するプロセス」である。わが国の主要な都市では、「道路上の雨水を下水道に集める方法」として、道路側溝を通じて行うものと雨水ますによるものが採用されている。東京都心部の場合には後者の雨水ますによる方法が導入されている。具体的には、道路側方に約20m間隔で雨水ますが設置されており、そこに水を集めて下水道へと運ぶような方式となっている。本研究では、できるだけ現状に即した解析を行うことを目指しており、ここでも関根らによる解析手法^{たとえ8), 9)}を用いることにした。実在の雨水ますは直径0.5m、高さ0.8mの円筒であり、その上面は地表面に接し、その底面付近にはこれと下水道とを結ぶ管渠(長さ L 、管径 d 、摩擦損失係数 f)が取り付けられている。この雨水ますを介した水のやりとりに関しては、この中の流れを摩擦損失ならびに形状損失を考慮に入れたベルヌーイの定理に基づいて計算することができる。一例として、下水管内のピエゾ水頭 H_p が雨水ます内の値 H_t を上回る場合についてふれると、この場合には下水道から地上への逆流が生じることになる。このとき雨水ますから道路面上へ逆流する流量 Q_R は、次の関係に基づき評価することができる。

$$\left(1 + f_e + f \cdot \frac{L}{d}\right) \frac{Q_R^2}{2g} + H_t = H_p \quad (1)$$

ここに、 f_e は入口損失を表す。なお、これまでのほとんどの解析^{3), 4), 5), 6)}では、前述した実際の道路側溝や雨水ますの役割を具体的に考慮する代わりに、この水のやりとりがマンホールを介して行われるものとして取り扱われてきている。なお、最近になって道路側溝による集水効果を考慮した解析⁷⁾も試みられている。

3.4 河川の流れの解析

河川の流れに関しては一次元不定流解析によるものとし、その際に、河川に降り注ぐ雨の量や、下水道あるいは道路面から流入(あるいは流出)する水の流量を、いわゆる横流入量(あるいは横流出量)として考慮する。流れの運動方程式の解法には、近年よく用いられるCIP法を適用した。第4章で説明する妙正寺川に関わる解析の場合には、河川全区間を20m間隔のセルに分割し、各々の河川セルとこれに面した道路上の各Control volumeとの接続関係や、河川セルと下水道とを結ぶ「雨水吐」に関わる情報を、すべて調べ上げてデータベース化した上で、これに基づいて解析を行った。図-2(b)中に描かれた○印がこの雨水吐の位置を表している。道路面上、下水道内ならびに河川中の流れを解析する際には、この「河川-下水道」あるいは「河川-道路」間の流入(あるいは流出)水量を計算・更新して考慮することが必要である。

「河川-下水道」間の水のやりとりに関しては次のように考える。前述の通り、下水道の終端が河川に接続されている地点に雨水吐が設置されている。もし、河川の水位が上昇し、下水道内の雨水吐直上流点の水圧よりも河川側の水圧の方が大きくなると、河川から下水道への逆流が生じる。雨水吐出口が河川の水面下に没する場合には、下水道終端におけるピエゾ水頭を河川側の水位に等しくとることにして、雨水吐を介した水の流出入量を評価した。なお、雨水吐地点の一部には逆流防止用のフラップゲートが設置されているところもあるが、本解析では実情を踏まえてその影響を無視している。また、「道路-河川」間の水のやりとりに関しては、秋山・重枝ら²³⁾に倣って本間の越流公式を用いて評価することにした。

3.5 住宅地に降った雨の取り扱い

住宅地に降った雨が下水道へ流出するプロセスについては、概ね次のように考えることができる。建物の

屋根に降った雨は、そのまま流れ下ってやがては軒樋に集められる。その後、この雨水は建物側面に沿う下向きの管路に入り込み、地表面下の住宅内管路に運ばれる。そして、最終的には住宅が面した道路の真下にある下水道に流出することになる。本稿では、このような一連のプロセスを簡略化し、次のようにモデル化した解析について説明する。すなわち、ある瞬間に建物の屋根に降った雨水の全量が時間 T_R だけ遅れて下水道に入り込むものとする。

ここでの基本的な考え方は以下の通りである。すなわち、(1)個々の住宅の規模とそれぞれの位置などを考慮して、住宅密集地を複数の住宅エリアに分割する、(2)一軒の住宅がもつ平均的な大きさをエリア毎に評価し、これを住宅ユニットと呼び、その面積を a とする、(3)時刻 t の瞬間にこのユニットから下水道へ流出する流量を Q_u とし、このエリアにおける住宅の建ぺい率 R_a ならびに降雨強度 $r(t)$ が一定であるとして、 Q_u を $Q_u = R_a \times a \times r(t - T_R)$ のように近似する、(4)各エリアの面積を A とすると、同時刻にこのエリアから下水道へ流出する総流量 Q_T は、 Q_u との関係で $Q_T = (A/a) \times Q_u$ となる、(5)このエリア内に存在する下水道計算点の総数を N_p とし、そのひとつひとつの下水道計算点を中心としたControl volumeへの流出がエリア内で一様に生じるものとすれば、その流量 Q_R は Q_T / N_p となる。以上のように、各住宅エリアからその中にある個々の下水道計算点に向かって流入する流量 Q_R は、次の関係により評価することができる。

$$Q_R = \frac{Q}{N_p} = \frac{1}{N_p} R_a A \times r(t - T_R) \quad (2)$$

第4章には、住宅からの雨水流出を上記のように取り扱った解析の結果が示されている。しかし、上記(3)で説明した時々刻々の Q_u の値については、上記のような仮定や遅れ時間というパラメータを導入することなく、これを連続式と運動方程式とに基づいて解くことが可能であり、これにより住宅地から下水道への流出流量 Q_R を求めることができる。現時点ではこのような解析も完了しており、その詳細については別の機会に公表の予定である。ただし、この結果によれば上記の T_R は概ね10～15分程度となることが確認されている。

4. 東京都心部で発生した最近の浸水事例とその数値予測

4.1 2008年に発生した雑司ヶ谷幹線下水道における水難事故に関わる再現計算

東京都豊島区雑司が谷付近では2008年8月5日昼頃、突然の集中豪雨に見舞われた。当時、この区域内の幹線下水道では工事が行われており、突然の水位の上昇により作業員が逃げ遅れて命を落とすという事故にまで発展した。事故が発生した地点から150mの距離にある東京都下水道局豊島出張所では降雨量の計測が行われており、その結果を図示すると図-3(c)のようになる。図の縦軸に示されている5分間当たりの雨量を単純に12倍した値が、同じ強さの雨が1時間継続した場合の時間雨量に相当する。5mm/5分間は1時間当たり換算すると60mmに相当することから、時間雨量50mmをはるかに上回る豪雨が生じていたことになる。ここでは、当時の状況を数値解析により再現した結果を示し、これを踏まえて本解析の妥当性ならびに住宅地からの雨水流出が下水道に与える影響などについて考察する。

図-3にはこの数値解析の結果をまとめて示した。本解析では下水道を断面積が等価な正方形に置き換えて計算しており、その一辺の長さを H と定義し、管内水深 h をこの H で除した値を相対水深と呼ぶ。この値が1となる地点では「満管」状態の流れとなっていることを意味する。図-3(a)には幹線下水道内の事故発生地点における無次元水深の時間変化が示されている。ここには、遅れ時間 T_R を5分、10分、15分と仮定した場合の解析結果が示されている。なお、 T_R の値としては、別途行った解析の結果から10～15分とするのが妥当であると判断されていることは既に述べた。図-3(a)を見ると、 T_R の値が大きくなるほど水深のピーク値は低下し、ピーク発生時刻は遅くなる傾向にあることがわかる。さらに、次のような点が明らかになっている。ただし、事故が発生したのは12:10～12:20頃であると推定されている。

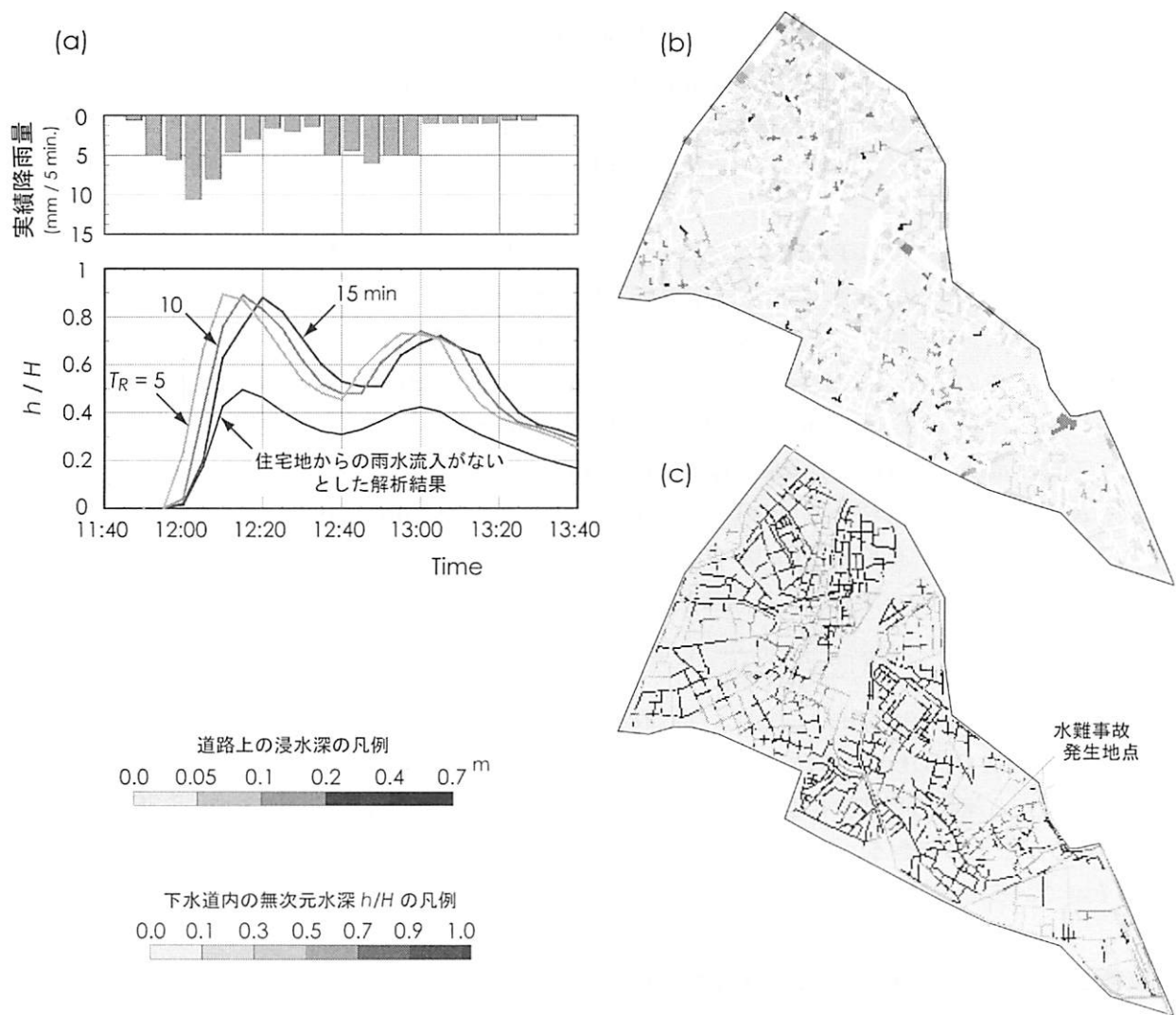


図-3 豊島区雑司ヶ谷区域を対象とした数値解析結果²²⁾：(a) 幹線下水道内の事故発生地点における無次元水深の時間変化(図の上段に当時の実績降雨データを示してある)，(b) 道路面上の浸水深のコンター図(12:20時点)，(c) 下水道内の無次元水深のコンター図(同時刻)。

- (1) 図に示されるような豪雨に見舞われると、雨水は速やかに幹線下水道に集められるため、事故発生地点ではわずか30～40分くらいの間に急激に水位が増加する特性が認められる。
- (2) 東京都によれば事故発生地点付近では当時の管内流速が 3.6 m/s であったと推定されている²⁵⁾。これに対して、 $T_R = 15 \text{ (min)}$ とした解析によれば12:20における計算値は 3.3 m/s となった。
- (3) 東京都が推定したとされる情報²⁵⁾によれば、事故発生時には下水管内の水深が1.4m程度であったとされ、相対水深に換算すれば0.9程度ということになる。これに対して、遅れ時間 T_R を5～15分程度とした解析結果によれば12:20における事故発生地点の相対水深が0.9程度となることがわかった。上記(2)の点とあわせて判断すると、解析結果は当時の状況をかなりよく再現していることになる。
- (4) 図-3 (a)中の黒の実線は、「住宅地に降った雨が下水道には流れ込まず、すべて住宅地内に貯留される」と仮定した場合の解析結果を表している。このようないわば理想的な状況にあるとするならば、事故発生地点の相対水深は最大値でも0.5程度に止まることがわかる。このことは、住宅地域から下水道に入り込む雨水の量が下水道にとっては無視し得ないほどの大きな負荷となっていることを意味する。もし、各家庭での雨水貯留が格段に進むならば、その程度に応じて下水道への負担が大幅に軽減される可能性がある。

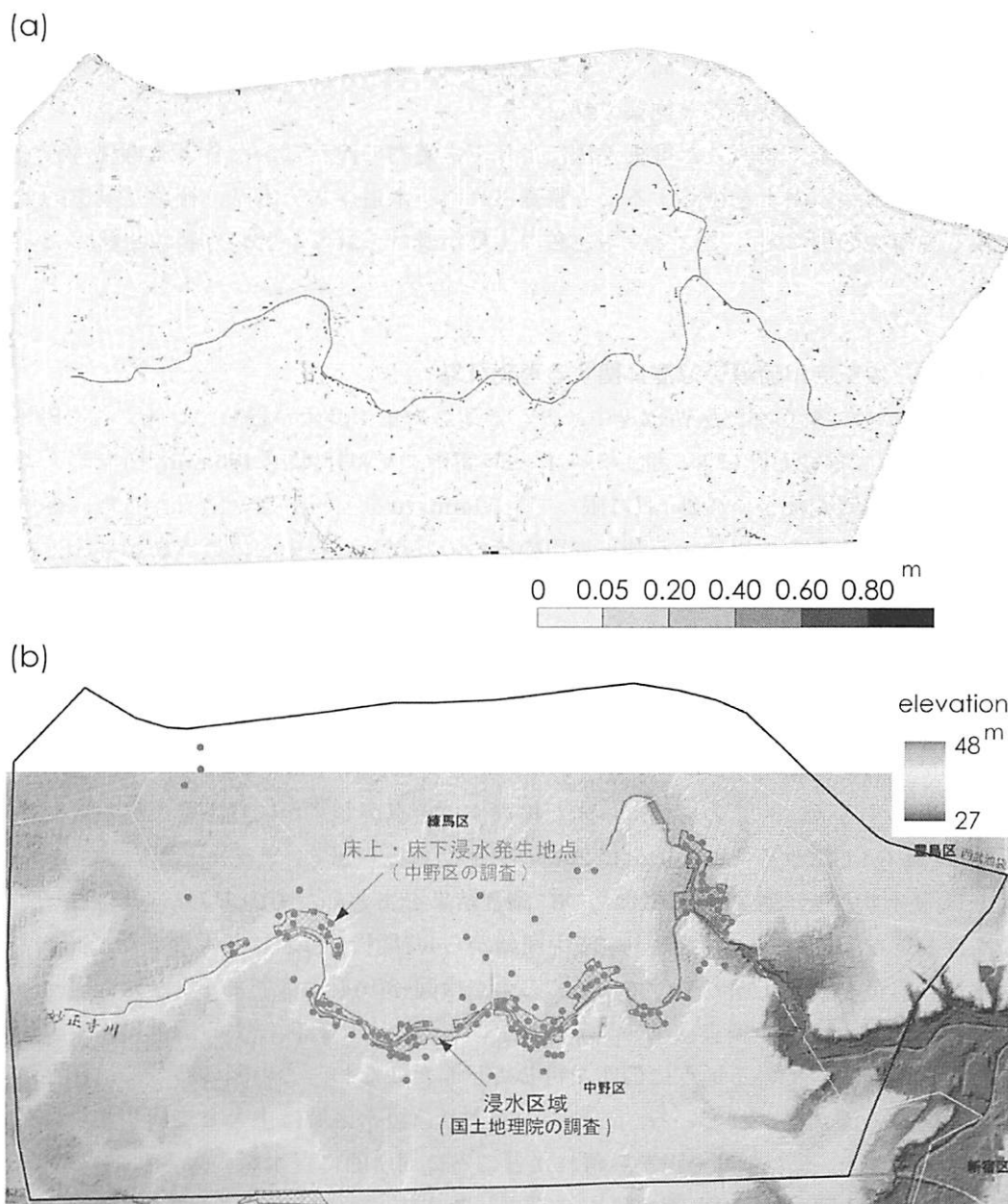


図-4 妙正寺川流域を対象とした地上の浸水状況: (a) 数値解析による道路上の浸水深コンター図, (b) 浸水状況の調査結果. (b)には地表の標高のコンター図の上に, 国土地理院の調査による浸水区域ならびに中野区による「床上・床下浸水」の発生地点が示されている. (b)は国土地理院により作成した図²⁴⁾に加筆・修正したものであり, 図の上方に位置する区域の標高コンター図までは示されていないのはそのためである.

図-3 (b), (c) には12:20の時点での地上の浸水深のコンター図と、下水道内の無次元水深 h/H のコンター図をそれぞれ示した。次に、図-3 (b), (c)を見ながら、この区域における当時の内水氾濫の状況について推察する。なお、図には前述の判断から、 $T_R = 15$ (min)のした解析結果のみ示されている。この図より、次のことが見てとれる。

(1) 降雨開始から30～40分の時間が経過する間に道路面上の浸水深は増大するものの、最大でも0.3 m程度に止まり、顕著な浸水には到らないものと考えられる。この点は実態とも一致しており、少なくともこの区域では浸水被害は報告されていない。

(2) 下水道内の水深の増加は顕著であり、降雨開始から30～40分が経過した時点でかなり広い範囲にわたって満管状態の流れとなっていた可能性が高い。事故発生地点に限らず下水道内で人が作業を継続できたとすれば降雨開始から20分かそれ以前までと推察される。

以上の結果などから、前章で説明した解析手法により下水道内の流れはかなりよく再現されているものと判断される。また、都市から雨水を排除するよう整備された下水道システムは、極めて効率的であるがゆえに、想定を超える規模の豪雨に対しては水位の急激な上昇が避けられないという特性を持つことが確認された。

4.2 2005年に発生した妙正寺川流域の氾濫に関する再現計算

2005年9月4日～5日には、東京都23区西部を中心とした地域を集中豪雨が襲っている。この降雨は、開始から約5時間40分にわたって継続したほか、開始から1～2時間後までの1時間に100 mm/hrを超える極めて大きな値となったほか、2～4時間後までの2時間に限っても50mm/hrを上回る強い雨であった。神田川流域はほぼこの地域の中に位置し、その支川である妙正寺川の流域では川沿いを中心に近年に稀にみる浸水が発生することになった。この神田川流域には、洪水の一部を受け入れる調節地が多く整備されている。この出水時に大きな効果を発揮したのが「環七地下調節地」であり、神田川本川の上流部ならびにもう一つの支川である善福寺川の水を取り入れることにより、河川の負担を大幅に軽減することができたと考えられている。著者らは、前述の解析手法を適用することによって、この豪雨時に妙正寺川流域で発生した浸水の状況をどの程度再現できるかに注目して研究⁹⁾を進めてきている。ここでは、簡単にその成果の一部を示しつつ、解析の妥当性について考察する。なお、この解析には未だ検討すべき点がわずかに残されていると認識しており、最終的な解析結果については改めて別の機会に公表の予定である。

図-4(a)は地上の浸水状況を表す解析結果ならびに調査結果をまとめたものである。解析結果については、浸水状況が最も深刻となると推定された時刻（降雨開始から4時間後）におけるものを示しており、ここには道路面上の浸水深のみ色を変えて塗り分けてある。この点は図-3(b)も同様である。また、図-4(b)には、国土地理院により行われた浸水区域の調査結果²⁴⁾が示されているほか、中野区による調査により「床上・床下浸水」が発生したことが判明している地点に○印を付して示した。なお、この図の背景には国土地理院による地表面の標高のコンター図が描かれている。これらの図より、浸水区域は主として河川沿いに広がる標高の低い区域に限定されること、その一方で川から離れたところに局所的に浸水深の大きな地点が散在すること、などが見てとれる。また、図-4(a),(b)を直接見比べることにより、数値解析によって0.20m以上の浸水が発生すると予測された地点と、実際に被害が生じたとされる地点とがかなりよく一致していることがわかる。以上のことより、ここで行った数値解析が現実をかなりよく再現する妥当なものであったと判断される。

5. 地下空間における浸水とそこからの避難誘導

東京に限らずわが国の大都市には、多くの大規模地下街や地下鉄駅があり、中小ビルの地下店舗や最近では個人住宅の半地下空間まで含めると、浸水する可能性のある地下空間はけっして少なくない。既に述べたように、極端に大きな強度をもつ集中豪雨に襲われたとき、最も深刻な浸水が懸念されるのはこの地下空間である。今後速やかに実情を把握し十分な対策を講じていくことが望まれる。著者らは、これまで浸水実績のある3つの大規模地下空間を対象として、その浸水危険性評価を目的とした数値解析を行ってきた。東京新宿の大規模地下街⁹⁾、渋谷駅地下街¹¹⁾ならびに地下鉄溜池山王駅¹⁴⁾がそれにあたり、そのいずれもが高層ビル群が林立する都心部の地下につくられたものである。現時点での研究の目的は、第一には数値解析を通じて当時の状況を再現し、その浸水危険性ならびに浸水拡大過程を理解すること、第二に実在の地下空間が浸水

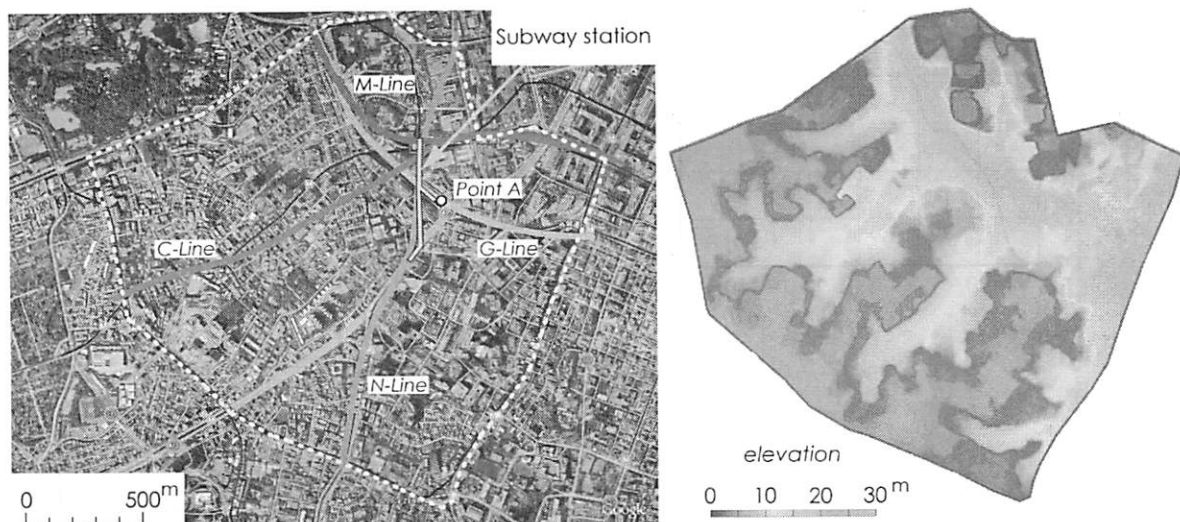


図-5 解析対象区域の概要：左の図中の破線が対象区域の境界を表す。図の中央付近に示された「ト」の字型の区域の真下に地下鉄駅がある。また、右側の図は地表の標高コンター図を表す。駅付近を中心にして東から西に延びる明らかな谷地形が認められる。この駅では図中に示されているように合計4路線の地下鉄が立体的に交差しており、駅構内では朝夕のラッシュ時を中心にかなりの混雑が発生している。この駅の真上のエリアには谷線が通るような地形になっており、道路上に降り注いだ雨水は自然と図中のPoint A付近に集められる。下水道によって雨水排除が行われるとしても内水氾濫が起りやすい地形であるといえる。

した場合に、そこに居合わせた利用者をいかに避難させるかを数値シミュレーションにより検討し、その避難誘導経路を見出すこと、などである。さらに、将来的にはこのような解析手法を用いて、今後想定されるさらに高強度の雨に対する浸水予測を行うこと、さらには豪雨時におけるリアルタイムの予報を行うことができるようにして、実用に供することも視野に入れている。こうした解析を行う上で不可欠な情報が降雨データであり、5分あるいは10分先を予測した降雨データを入力として計算を進めていくことが必要となる。集中豪雨時の降雨予測の精度向上を可能とする技術の進展に期待する。

さて、ここでは地下鉄 T 駅を対象として行われた浸水解析を例にその結果を示しつつ、これについて簡単に説明を加える。この地下空間は1999年に浸水被害を受けており、できる限りそのときの状況を再現することに努めた。ただし、降雨データを含めて当時の浸水状況をうかがい知ることのできる定量的な情報は、著者の知る限りほとんどない。そこで、その周辺で計測されたデータを参考に降雨データを推定して与えることにした。ただし、この解析の妥当性を検証するに足る信頼性の高いデータが得られていないのが実状であり、この地下浸水の解析に関してはその検証を今後の課題とせざるを得ない。なお、この解析方法の詳細については別論文¹⁴⁾を参照されたい。

この地下浸水に関しては、道路面上の氾濫水が連絡階段を通じて地下空間に流れ込むことにより生じるため、この浸水解析は前章までに説明してきた道路面上の氾濫解析と連動しつつ行う必要がある。この連絡階段は車道横の歩道上に設けられていることがほとんどであり、地下に向かって水が流れ込むようなことがあると、その分だけ道路面上の浸水深は低下することになる。著者らの解析は、こうしたことももちろん合理的に考慮されている。図-5には、この解析で対象とする区域の概要をまとめて示した。この区域の中央やや右上に示されている「ト」の字型の位置に地下鉄の駅が存在しており、歩道とは10を超える数の連絡階段により結ばれている。また、この駅では図示された合計4つの地下鉄路線が立体的に交差しており、朝夕のラッシュ時には通勤客でかなりの混雑が生じている。図-5の右側にはこの区域内の地上標高のコンター図が示されている。この図よりこの駅の真上の区域が「谷」に相当し、この区域に雨水が集まりやすい地形となっ

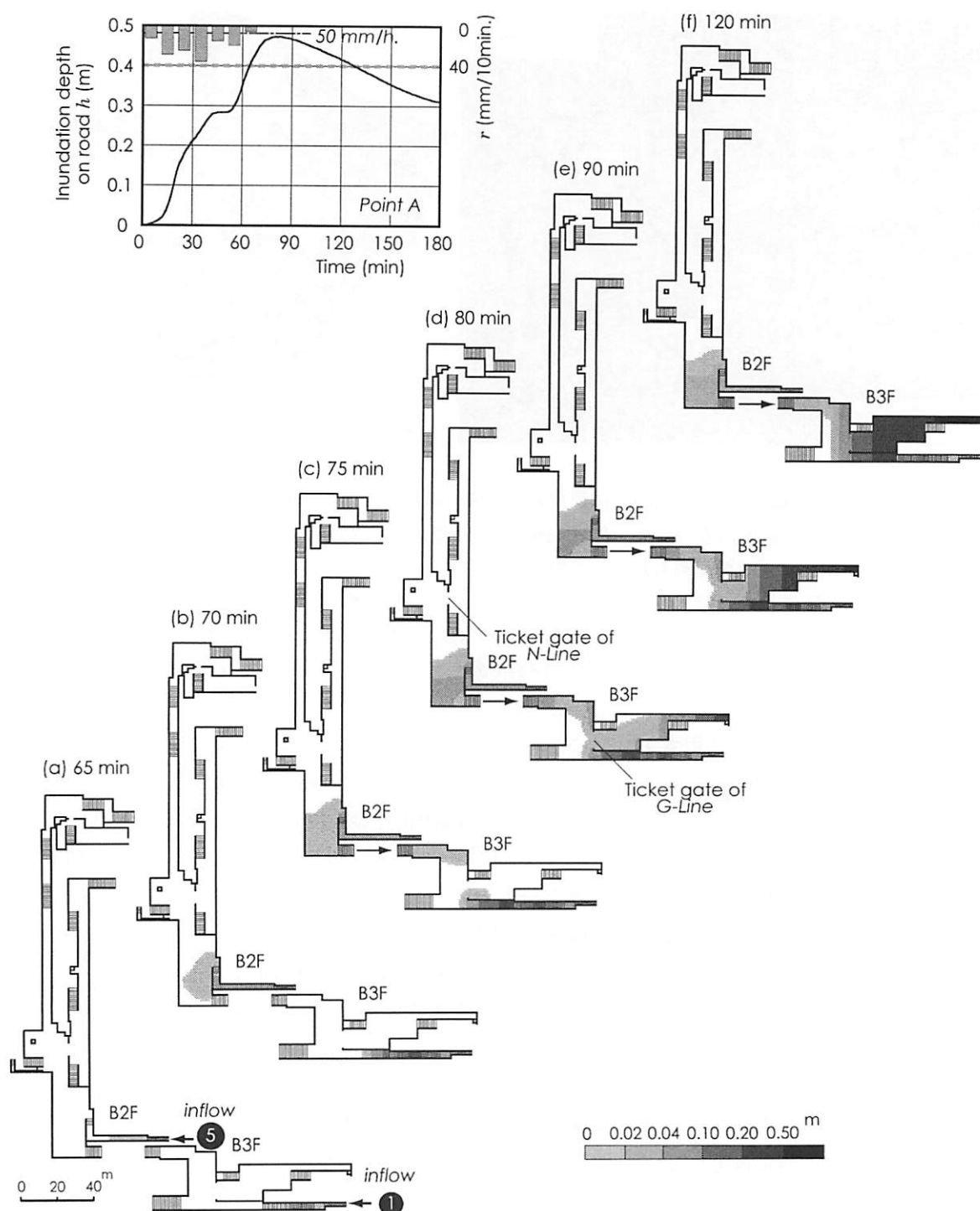


図-6 地下鉄駅構内の浸水解析結果：図の左上には降雨データとともに、図-5 に示された地点 Point A における地上浸水深 h の時間変化が示されている。この水深が 0.40m 以上になると歩道上からの連絡階段（図中に①ならびに⑤として示された Point A に面した連絡階段）を通じて地下空間への流入が生じる。（a）～（f）の上部に記された数字が降雨開始からの時刻を表す。ここでは「ト」の字型の空間のうち浸水の可能性のある北側部分のみを示してある。

いることがわかる。なお、この区域全域にわたって下水道がかなり密に敷設されており、時間雨量50mmまでであれば効率よく雨水排除ができるようになっている。

図-6は数値解析結果の一部をまとめて示したものである。まず道路面上の浸水に関しては次のことが理解された。道路面上で浸水が生じた場合に、この地下空間に向かって水が進入する可能性がある「地上から地下空間への連絡階段」は、図-5中の「Point A」を中心としたControl volume内に位置するもののみであり、具体的には図-6左下の(a)の図に記された階段①と⑤の2つに限定される。これ以外の連絡階段を通じて氾濫水が流れ込むことはないものと判断している。従って、このPoint Aにおける地表面上の浸水深こそが重要な意味をもつ。図-6の左上にはこの地点における浸水深の時間変化の解析結果が、降雨データとともに示されている。連絡階段の入口がある歩道上には0.15m程の高さのステップが設けられており、結果としてPoint Aにおける道路面上の浸水深が0.4m(図-6左上の図の破線参照)を超えると、上記二つの連絡階段から水が流入し、地下浸水が生じるものと判断される。この図より、ここで対象とした降雨の場合には、降雨開始後63分から128分程度の時間帯に限り道路面上の氾濫水が流入することになる。さらに、この結果を踏まえて流入流量を求め、これを境界条件として地下空間内の水の流れを計算¹⁹⁾すると、図-6の(a)-(f)のような結果が得られた。ここには、地下空間全体にわたっての浸水深のコンター図が示されている。ただし、「ト」の字型をしたこの空間の南半分に相当する通路部分にまで水が入り込む可能性はないと判断されたため、この部分の記載を省略してある。この結果より次のことが理解された。すなわち、(1)地下2階の南端(すなわち図のB2F部分の下端)付近のフロアーが南に向かってわずかに傾斜しているため、階段⑤から流入した水は北側には広がらず、浸水区域はかなり限定される、(2)階段①ならびに⑤からの流入水は最終的にはB3Fの右端に位置する最深部に向かって流れることになり、その最大浸水深は0.7m程度となるとの結果が得られた。このような浸水が生じた場合には、少なくとも水の流れ下る階段を使わずに避難することが望ましく、安全にかつ走ることなく歩いて難を避けることのできる最適経路が見つけられるとよい。対象とした雨に関して言えば十分可能と判断される。なお、ここで説明することはしないものの、こうした浸水解析に加えて、この地下空間からの避難行動に関する数値解析ならびにこの結果に基づく避難誘導経路に関わる検討も行われている。詳しくは別論文を参照されたい²⁰⁾。

これまで検討の対象としてきた3つの大規模地下空間の場合、道路上の氾濫水が流入する連絡階段は、いずれも1または2箇所に限られるとの結果が得られている。このような情報は、事前に浸水対策を講じる上で極めて重要であり、浸水が懸念されるような雨の最中にはこれらの連絡階段の監視に特別の注意を払えばよいことになる。そして、どうしても必要と判断される場合には、予め閉鎖するなどの措置を講じれば被害の発生を未然に防ぐあるいは被害を軽減することも可能である。大規模地下街や地下鉄路線が立体交差するような駅の構造を調べると、段階的に建設された後に接続されて現在の姿になっているものも少なくなく、それ故に非常に複雑な構造を持つものが多い。また、防火上の観点から隔壁が設けられていることも多く、空間内の見通しがよいとはいえない。これがいざというときの避難を難しくしている。既存の地下空間は浸水時のことまで考えてつくられてきていない。このため、地下空間に関しても次のような点についての検討が必要である。すなわち、(1) 対象とする地下空間が内水氾濫の危険性の高い区域に位置しないか、(2) 地表面上の氾濫水が地下に向けて流れ込む可能性のある連絡階段はないか、(3) 氾濫水は流入後どのような経路をたどってどの範囲まで拡大するか、(4) 浸水深はどの程度か、(5) このような事態に到ったときに利用者を避難誘導する最適なルートをいかに確保することができるか、などである。このためには、図-6のような数値解析が極めて有効であるといえよう。

6. おわりに

東京都心部のように高度に都市化された地域には、道路が生物の毛細血管のように密に延びており、しかも道路に囲まれた区域である「街区」には空地はほとんど残されていない。すなわち、街区は高層ビル群や

中低層の商業用ビルで占められているか、あるいは住宅地となっている。このため、河川からの大規模な越水でも生じない限り、氾濫水の伝搬経路となるのは道路ネットワーク上に限られる。このような地域が今後想定を超える規模の豪雨に見舞われた場合の浸水状況の予測には、著者による解析手法の適用が望ましく、これまでの被災事例についての情報とあわせて考えることで、より有益な知見を得られるものと考え、「街路ネットワーク氾濫解析モデル」による数値予測は概ね完成の域に達しつつあり、今後はこれを浸水あるいは氾濫に関わる数値予報へと発展させていく予定である。たとえ想定を超える雨であっても住民あるいは利用者が深刻な被害に遭わないようにするためには、確度の高い情報を少しでも早く提供できるようにすべきであろう。また、内水氾濫が懸念される区域にある地下空間の場合には速やかな対応が望まれる。地下空間管理者は自らの施設の危険性の有無を認識し、避難誘導まで視野に入れて対策を練っておくことが求められる。そのためのツールとして著者らの手法^{14), 20)}は有効と考えられ、実務の面で活用されていくことを期待する。

最後に、地下浸水との関係でバリアフリーについてふれておく。近年、高齢者や身体にハンディキャップをもつ人に対する利便性を高めるため、バリアフリーの空間整備が進んできている。たとえば、車道と歩道との段差をなくす、あるいは歩道から地下空間へ進入する入口に設けられていたステップをなくすといった対策や、歩道から地下階へ向かうエレベータを設置するなどの対策がこれに当たる。こうしたことは、今後の都市空間のあり方を考えていく上で必要なことではあるが、地下空間の浸水という観点からすると、道路面上の氾濫水が地下空間に流入する可能性を高める方向の変更を加えたことになる。少なくとも浸水が懸念される区域に対しては十分な検討を踏まえて、さらに安全を確保する工夫を期待したい。

謝辞：ここにまとめた研究成果の一部は、当時、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)の助成を受けて行われたものである。数値解析を行うに当たり、当時の大学院生である中村 淳君、青野雅士君、風間大彰君の協力を得た。また、東京都建設局河川部ならびに下水道局、東京メトロの担当者には関連情報の提供をいただくとともにご意見を賜った。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 野村孝雄：集中豪雨による東京都内における水害について，土木学会誌，Vol. 90, No. 11, pp.51-52, 2005.
- 2) 東京都下水道局：雑司ヶ谷幹線再構築工事事故報告書，2008.
- 3) 相良亮輔，錦織俊之，井上和也，戸田圭一：枝線下水道を考慮した市街地氾濫解析，水工学論文集，第48巻，pp.589-594，2004.
- 4) 川池健司，井上和也，戸田圭一，野口正人：低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析，土木学会論文集，No.761/II-67，pp.57-68，2004.
- 5) 秋山壽一郎，重枝未玲，田邊武司：下水道網を考慮した飯塚市街地の氾濫解析，水工学論文集，第53巻，829-834，2009.
- 6) 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.
- 7) 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，817-822，2009.
- 8) 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，pp.47-58，2005.

- 9) 関根正人, 風間大彰, 青野雅士: 2005年集中豪雨により発生した妙正寺川流域の氾濫被害に関わる数値解析, 水工学論文集, 第53巻, pp.811-816, 2009.
- 10) 戸田圭一, 井上和也, 大八木亮, 中井 勉, 竹村典久: 複雑な地下空間の浸水実験, 水工学論文集, 第48巻, pp.583-588, 2004.
- 11) 関根正人, 河上展久: 都市域における内水氾濫と地下鉄駅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, pp.595-600, 2005.
- 12) 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.
- 13) 米山 望, 間島真嗣, 戸田圭一, 山本大介: 都市水害時の小規模地下空間の浸水過程に関する数値解析的検討, 水工学論文集, 第51巻, pp.541-546, 2007.
- 14) Sekine, M. and Nakamura, J.: Numerical simulation of inundation in underground space in highly urbanized area in Tokyo, Proc. of 8th International Conference on Urban Drainage Modeling, 2-C1, 2009 (CD-ROM).
- 15) 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, 583-588, 2006.
- 16) 大西良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用, 水工学論文集, 第52巻, pp.841-846, 2008.
- 17) 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.
- 18) 原田英治, 後藤仁志, 酒井哲郎, 久保有希: 地下浸水時の群集避難の個体ベースシミュレーション, 水工学論文集, 第50巻, pp.589-594, 2006.
- 19) 関根正人, 本山量啓: 地下空間浸水時の避難誘導に関する数値解析, 水工学論文集, 第52巻, 847- 852, 2008.
- 20) 関根正人: 複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水過程と避難誘導に関する数値解析, 水工学論文集, 第54巻, pp.907-912, 2010.
- 21) Chaudhy, M. H.: Applied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold.
- 22) 関根正人, 青野雅士, 風間大彰: 雑司ヶ谷幹線下水道における水難事故に関する数値解析, 水工学論文集, 第54巻, pp.901-906, 2010.
- 23) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 津崎周平: 氾濫流量の評価と堤内物体群の影響, 水工学論文集, 第51巻, pp.523-528, 2007.
- 24) 国土交通省国土地理院: 平成 17 年台風 14 号に伴う前線豪雨(9 月 4 日)による浸水区域概要図.PDF, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/TAIHUU14/index.html>.
- 25) 日経 BP 社 Web Page ケンプラッツ: 2008 年 8 月 18 日付記事, <http://kenplatz.nikkeibp.co.jp/article/const/news/20080818/525319>.