

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

NUMERICAL ANALYSIS OF INUNDATION CAUSED BY A LOCALIZED TORRENTIAL RAIN IN THE MYOSYOJI RIVER BASIN IN 2005

関根正人¹・風間大彰²・青野雅士²

Masato SEKINE¹, Hiroaki KAZAMA² and Masashi AONO²

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

Recently, we often experience a localized torrential rain whose intensity exceeds much beyond the designed magnitude for the drainage system in Tokyo. On September 4-5, 2005, such an extremely heavy rainfall caused the inundation damage in the Myosyoji River basin. In this study, numerical simulation was conducted to investigate the expanding process of this inundation damage. As a result of this analysis, it was concluded that a reverse flow from the river to the drainage networks and the one from the drainage pipe to the road surface occurred and made the state of inundation be much more serious in some local areas.

Key words : *inundation damage, drainage network system, localized torrential rain, numerical analysis.*

1. 序論

2008 年夏, わが国では多くの地域が集中豪雨に見舞われた。その結果として, 愛知県岡崎市では甚大な浸水被害が生じ, 東京雑司ヶ谷では雨水が急激に下水道に集中したため人命が失われることとなった。雨水を都市から速やかに排除する仕組みとして, 東京では, 道路上に降り注いだ雨をまずは雨水ますに集め, これを下水道網に取り込むことで都市河川まで効率よく運ぼうとするシステムができあがっている。しかし, 今後懸念される突発的でしかも想定を超える規模の集中豪雨に対して, 現状の雨水排除システムが十分に機能するかは定かではなく, 早急にその検討を進めていく必要がある。

東京 23 区西部区域では, 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よって, 床上浸水を含む深刻な浸水被害が発生した¹⁾。中野区・杉並区を流れる神田川ならびにその支流の妙正寺川・善福寺川の流域では, 豪雨による直接的な浸水や道路橋付近からの河川水の氾濫に加えて, 下水道の一部から雨水が地上へ逆流したことにより被害がさらに深刻なものになったと推察されている。本研究では, 特に被害が大きかった妙正寺

川流域を対象とし, この住宅密集地域における浸水被害実態を把握するとともに, 氾濫被害が広がっていくプロセスに関する再現計算を行った。この際, 著者らがこれまでの解析において適用してきた解析モデルに, 「河川-下水道」ならびに「河川-道路」間の水のやりとりを評価するサブ・モデルを新たに加えることにした。そして, 現状の下水道がどのくらい効果的に雨水を排除できるかについての考察を加えている。また, 「雨水が下水道から地上へ逆流するプロセス」に注目し, この被害を深刻化させた原因について探ることも目的の一つとしている。

2. 解析概要

(1) 解析対象区域と降雨データ

本研究で解析対象とした区域の概要を図-1 にまとめて示す。解析対象区域の総面積は約 23.5km² であり, 東西の境界を山手通りと都道環状八号線, 南北の境界を JR 中央線と西武池袋線の位置にとることにした。このような境界設定に当たっては, 地上氾濫水ができる限り境界を越えて出入りすることのないように留意した。対象区域内を流れる妙正寺川は, 源流からその下流 8.68 km までの区間であり,

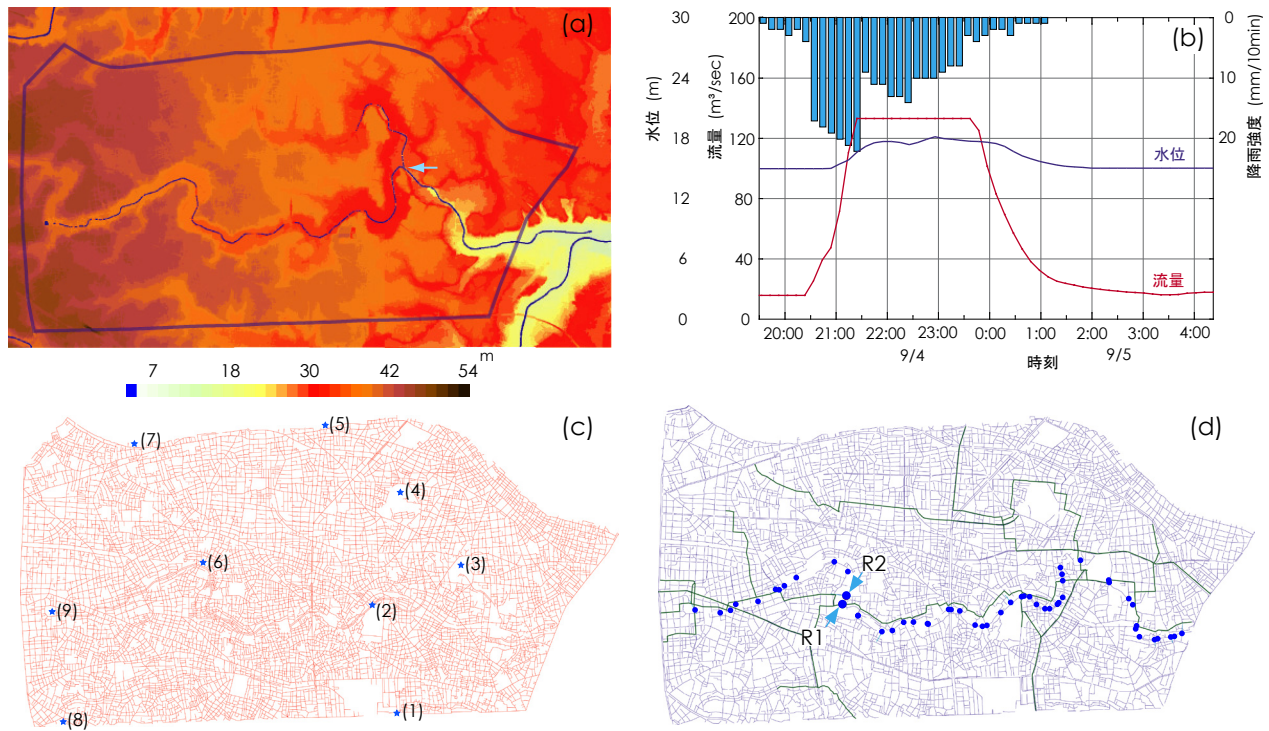


図-1 解析対象区域の概要：(a) 標高のコンター図（図中の枠線がその境界を、色はその標高を表す．図中に矢印で示して地点が支川である江古田川との合流点を示す），(b) 降雨量，河川上流端において試算された流量ならびに河川下流端における実測水位の時系列データ，(c) 道路ネットワーク（図中に示した地点は(1) 中野駅，(2) 千歳橋，(3) 哲学堂公園，(4) 平和の森公園，(5) 練馬駅，(6) 鷺ノ宮駅，(7) 富士見台駅，(8) 荻窪駅，(9) 妙正寺公園である），(d) 下水道ネットワーク（緑色の太線は幹線下水道を表し、図中の●印は下水道が河川に接する地点に設置されている雨水吐を指す．図中に番号を付して示した雨水吐は図-4 中のものと同一）．

その下流端は神田川との合流点から 1.02 km 上流に位置する．この区域には、幹線道路沿いに高層のビル群が存在するほか低層の住宅街が広がっており、その程度はわが国でも有数の高密度といえることができる．すなわち、各住宅間のスペースはないに等しく、わずかに存在する公園や学校を除けば、水の通り道となる空地はほとんどない．この区域の地形については、図-1(a) に色分けして示した地表標高コンター図からもわかるように、河川に沿って標高の低い区域があるほかはほぼ平坦と考えてよい．

本解析では、図-1(b) に示すような実績の降雨データを対象とする．この図を見るとわかるように、降雨開始から 1 時間後の 20:30 から 1 時間にわたって 100 mm/hr (16 mm/ 10 min) を超える豪雨が降っており、その後 2 時間にわたって想定規模 50mm/hr を上回る雨が続いたことがわかる．そして、降雨開始から約 5 時間 40 分後に一連の降雨が終了している．

この図-1(b) には、河川上流端における流量データと、下流端における水位データがあわせて示されている．妙正寺川の源流には妙正寺池があり、この河川の上流端流量は、元々この池への湧水量に応じて決まっていた．しかし、現在では、この河川の上流端に幹線下水道が接続されており、解析区域のさらに西側から運ばれてくる雨水が流入してくるた

め、豪雨時の上流端流量はこの流入流量の影響を顕著に受ける．しかし、現状では、このような流入流量のみならず各地点における河川流量のデータも直接的にはとられていない．当時の流量を知る上で唯一の手がかりは、東京都が千歳橋地点を対象に試算した流量データであり、本研究ではこれを基に上流端流量を推定した．具体的には、複数回の予備計算を通じて、千歳橋より上流側の河川区間に下水道から流入してくる水の流量の総和がどのような値となるかを把握した上で、千歳橋地点における流量からこの流入量を差し引くことにより上流端流量の時系列データを評価した．

妙正寺川には北側から支川の江古田川が流入している．また、二つの河川の合流点の下流側には比較的規模の大きな調節地があり、既に運用されている．しかし、本研究ではこれらの影響を的確に取り入れるには到っていない．そこで、江古田川の流域ならびに図-1(a) 中に矢印で示した合流点よりも下流側の区域の解析結果には、精度の面で問題があると言わざるを得ず、今後の課題と考えている．

(2) 数値解析モデル

数値解析の基本的な考え方は前報^{2), 3)}において説明してきたものと同一である．すなわち、都市

域の地上で生じる氾濫現象に関しては、図-1(c)に示されるような道路ネットワーク（計算点の総数：20235）を対象として解析するのが合理的と考え、ここでもこの方法によるものとした。本解析では、隣接する複数の交差点の間の中立二等分線で区切られた道路区域をコントロールボリュームとし、そこにおける水深を計算したほか、その境界において道路上の流れの流速を計算している²⁾。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(d)に示された下水道ネットワーク（計算点の総数：11373）を対象に行った。下水道内の流れの解析は、基本的には道路上の流れの解析と同様であり、下水管結節点を中心としたコントロールボリュームに対して行うものとし、ここではスロットモデルの考え方を導入している。この詳細については既発表論文³⁾において説明されており、紙面の制約からこれについての記述はここでは省略する。なお、管路の長さ、管径などの下水道網の詳細については、下水道台帳より読み取った値を用いた。

この解析を行う上で、「道路上に降り注いだ雨水を下水道に取り込むプロセス」ならびにこの逆の「下水道内の水が地上に逆流するプロセス」が極めて重要である。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、これによらず雨水ますのみによるもののいずれかを採用している。ここで対象とする東京都心部の場合には後者の方法を採用しており、道路側方に約20 mおきに雨水ますが設置され、これを介して集水する方式をとっている。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、著者らによる解析モデル³⁾をここでも適用することにした。ここでの雨水ますは、直径0.5 m、高さ0.8 m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 、断面積 a 、摩擦損失係数 f ）が取り付けられている。本解析では、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依拠して解いている。そして、下水管内のピエゾ水頭 H_p が雨水ます内の値 H_t を上回る場合には、下水道から地上への逆流が生じることになる。この際に個々の雨水ますからの逆流流量 Q_R は、

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

の関係から求めることができる。ここに、 f_e は入口損失を表す。なお、従来の多くの数値解析では、上記の道路側溝や雨水ますの役割を考慮する代わり

に、マンホールにおいて地上と下水道との水のやりとりを行うものとしてきた^{たとえば4), 5)}。この点において本解析とこれらの解析とは異なる。

河川に関しては、一次元不定流解析を行うことにし、河川に降り注ぐ雨や下水道あるいは道路から流入（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）として考慮した。この流れの運動方程式を解く際には、移流項の評価に近年よく用いられるCIP法を適用している。河川に関しては、これを20 m間隔で434個のセルに分割し、各々の河川セルと河川に面した道路上の各コントロール・ボリュームとの接続関係や、河川セルと後述する個々の雨水吐との関係などを調べ上げ、これをデータベース化した。その上で、これに基づいて時々刻々の水のやりとり量を評価した。この点は、道路上の流れあるいは下水道内の流れの解析においても同様であり、河川・道路ならびに下水道の間の水のやりとりを合理的に取り扱う解析となっている。

上記の河川と下水道との接続に関しては次のように考える。下水道の終端の河川と接する位置には雨水吐が設置されている。図-1(d)中の●印がこの雨水吐設置地点を表す。もし、河川の水位が上昇し、河川側の水圧が各々の雨水吐の直上流における管内圧力よりも大きくなると、河川から下水道内への逆流が生じることになる。この場合には、下水管末端における水圧を河川側の水位に応じて時々刻々と与えることにし、雨水吐に接続されている下水管内の流速を評価する際に考慮することにした。なお、本解析では、実情を踏まえて、対象区域内に一部設置されている逆流防止用のフラップゲートの影響を無視している。また、道路と河川との間の水のやりとりに関しては、秋山・重枝ら⁶⁾の論文を参考にしつつ、本間の越流公式を用いて評価することにした。

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、Manningの粗度係数 n との関係でその抵抗を定めている。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, 0.02とした。

3. 結果と考察

図-2には再現計算の結果をまとめて示した。このうち、(a)～(c)は降雨開始(9月4日19:30)から2, 4ならびに6時間後を対象として描いた地表浸水深のコンター図である。図中のクリーム色で塗られた部分はほとんどが建物群で占められている区域であり、ここには水が流入することはないものとした。一方、それ以外の区域についてはその浸水深に応じて色を変えて塗りつぶしてある。同図(d)は被害

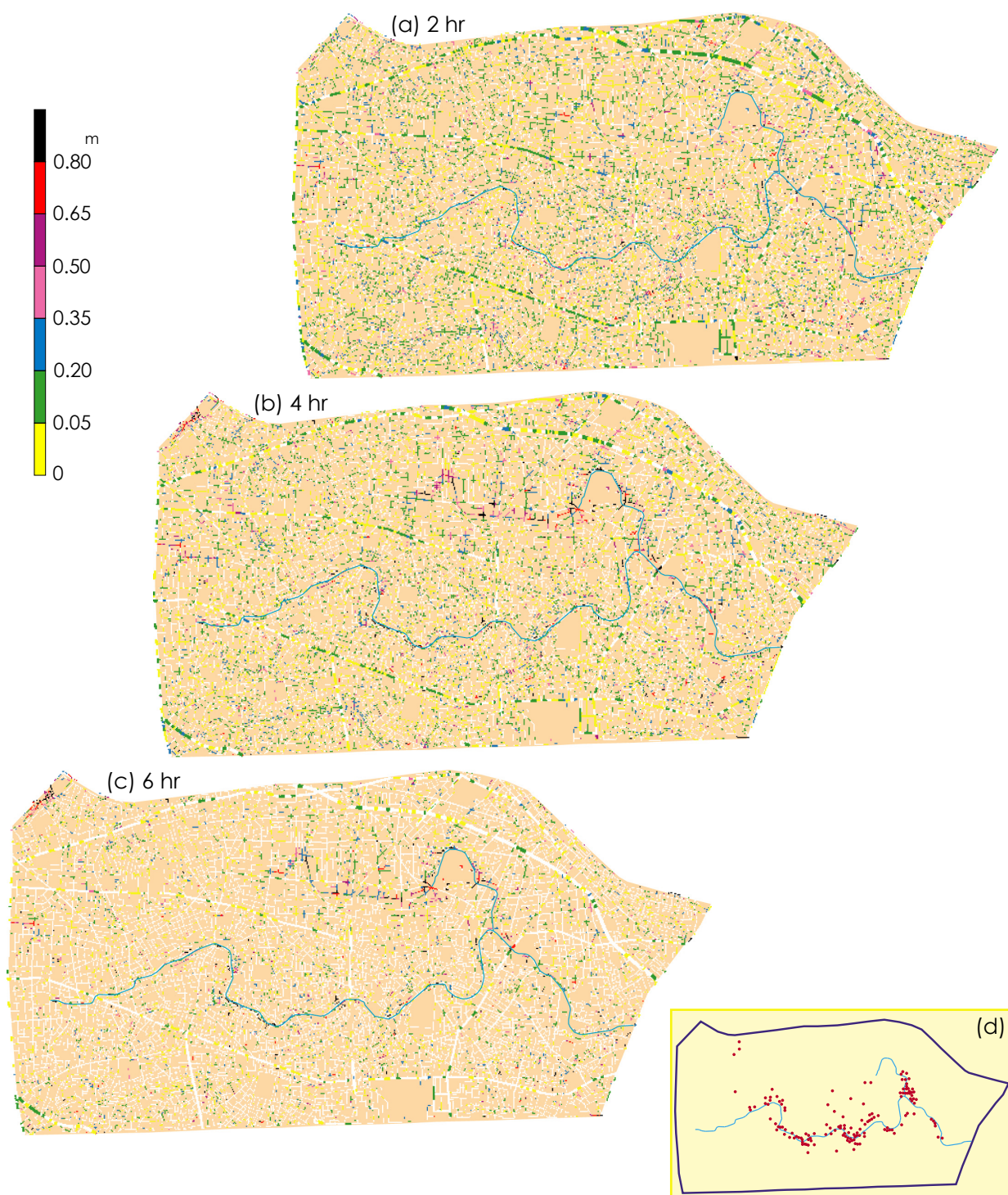


図-2 地表の浸水状況：(a)～(c) 浸水深のコンター図（数字は降雨が開始した 19:30 を始点とした経過時間を表す），(d) 中野区が公表した浸水被害調査の結果（図中の●印の中心位置において床下あるいは床上浸水が発生したとの報告がある）

直後に中野区が行った調査の結果（中野区 Web Site www.city.tokyo-nakano.lg.jp より引用）であり，少なくとも●印の中心位置において床下あるいは床上浸水の発生が報告されている．なお，図-2には解析対象とした全範囲に対する解析結果が示されているが，江古田川流域ならびにこの川との合流点より下流側の区域については，解析精度が十分でない恐れがある．そこで，ここでは合流点よりも上流側の妙

正寺川流域に対してのみ考察を加えていく．

まず，図-2 (a) の降雨開始 2 時間後は，想定規模の 2 倍を超える強度の雨が降り続いた直後であり，主要幹線道路の特に標高の低い地点を中心に冠水が生じているほか，対象区域内の広い範囲にわたって浸水していることがわかる．次に，降雨開始 4 時間後の図-2 (b) を見ると，河川沿いの標高の低い区域において特に規模の大きな浸水が生じており，この



図-3 江古田川との合流点より上流側の妙正寺川流域に注目した浸水状況の拡大図（降雨開始から4時間後）：(a) 浸水深コンター図の拡大図（凡例は図-2参照），(b) 下水道からの逆流流量（地表単位面積当たりの逆流流量）の平面分布．図中の青色の○印は浸水実績地点（図-2 (d) 中の●印参照）．図の右上の★印の位置が合流点を表し，流れは左から右の方向である．

時刻において最も深刻な状況になっていることがわかる．さらに，降雨開始6時間後の結果である図-2 (c) を見ると，河川沿いの区域を除けば浸水状況は速やかに改善され，下水道を通じて地上の水が効率よく排除されたことがわかる．このことは，想定した強度の降雨であれば現状の雨水排除システムは極めて効率よく機能することを意味する．一方，これを超えた規模の豪雨に対しては，その雨水処理能力に限界があると言わざるを得ない．

図-3は，江古田川との合流点より上流側の妙正寺川流域に注目してとりまとめた解析結果であり，図-3(a)には浸水深コンターの拡大図が示されている．図上には浸水被害が報告された地点を比較のため併記した．浸水深の計算値が大きな地点と実際に浸水が報告された地点とは比較的良好に一致しており，解析結果が概ね妥当なものであると判断される．

次に，現状の雨水排除システムが抱える問題点について考察を加える．まず，下水道から地上への逆流の発生状況についてまとめた結果が図-3(b)である．ここには，地表単位面積当たりの逆流流量の計算結果を，その値の大小に応じて色を変えて示している．この図より，浸水被害が報告されている地点と逆流が生じていたと推定された地点とがよく一致していることが見て取れる．このことは，浸水時に雨水ますを通して下水道の水が地上にあふれ出した可能性が高いことを意味する．なお，ここで適用した解析モデルはマンホールからの逆流を陽に表現す

るものではなく，すべての水が雨水ますを経由して逆流するとしている．しかし，この結果から判断すると，実際には，下水道にマンホールの蓋が飛ぶほどの雨水の集中が生じていたものと推察される．

一方，河川の増水に伴いその水位が上昇すると，下水道を通して運ばれてきた雨水が河川に流れ出ることができなくなるばかりか逆流まで生じる恐れがある．次に，この点について考察を加える．解析結果によれば，降雨開始から2～5時間が経過した時間帯を中心に，かなりの地点で雨水吐を通じて河川から下水道への逆流が生じたことが確認された．ここでは，このうち二地点の雨水吐から逆流した水の移動経路に注目する．図-4にその概要をまとめて示した．幹線下水道に接続されている雨水吐（計算点R1）では，少なくとも降雨開始から100～300分にかけての時間帯に，5分くらいの規模で河川から下水道への顕著な逆流が断続的に生じたという結果を得ている．この地点で河川から逆流した水は，隣接する幹線下水道上の結節点S1において左側（上流側）からの流れに合流した後，河川の対岸に位置する結節点S2に運ばれる．流量が一時的に増大した点S2では，管内の水圧が増大し，この地点に接続する雨水ますを通じて水が地上に逆流する結果となった．この下水道計算点に接続されているのが道路計算点P1である．地上にあふれ出た水は，その後，道路上を流れ下り，P1→P2→P3→P4→P5→P6を経て点P7に到る．この点P7を中心とする区域は

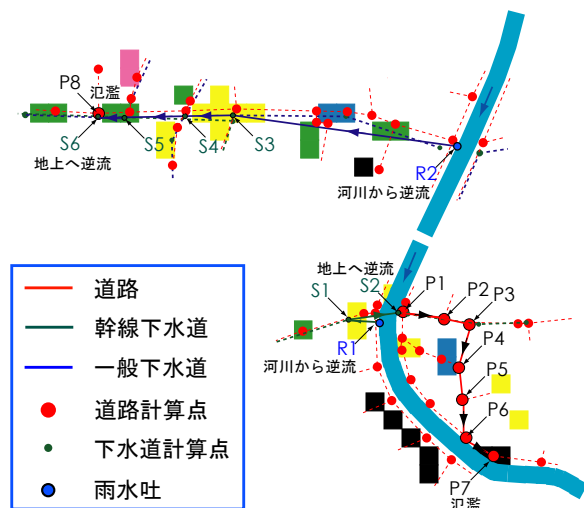


図-4 河川あるいは下水道からの逆流とこれに伴う地表の浸水深増大の発生状況の概念図：図中の実線が水の移動経路を示す。英数字は計算点番号を表し、黒字が道路計算点、緑字が雨水吐を含む下水道計算点を示す。ここでは、参考のため図-2(b)に示した浸水深コンター図の一部を併記した。

隣接点に比べて標高が2～4 mほど低いため、地上にあふれ出た水はこの地点に集められることになり、その浸水深をさらに増大させる結果となった。この地点での浸水深が80 cmを超える大きな値となる理由のひとつに、このような影響があるものと判断される。さらに、一般の下水道に接続された雨水吐（計算点R2）でも、点R1とほぼ同じ時間帯に河川から下水道への逆流が生じている。この逆流した水は、同じ下水道内の隣接する計算点S3に流れ出た後、S3→S4→S5を経て点S6に運ばれる。ここに至る経路上の複数の地点において、下水道に接続する雨水ますから地上に向かって水があふれ出ることになった。このうち最も顕著な地点が道路計算点P8であった。この地点は、周囲より標高が低いため、規模は20 cm程度と小さいもののスポット的に浸水が生じることとなった。以上のシナリオは、実際に計算された逆流の流量や、道路上あるいは下水道内の各地点での水深ならびに流速のデータを基にまとめたものである。これ以外にも河川からの逆流や雨水ますから地上への逆流が生じている地点は数多く確認されており、上記の二例が特殊なものではないことも確認されている。

本解析では、河川から堤内地側への氾濫が生じることはなかった。これに対して、実際には、橋桁・橋脚などの影響により河川水の堰上げが起り、越水氾濫している地点があったと報告されている。これは、ひとつには河川の流れの解析において、橋の影響を考慮しなかったためと考えている。この点も今後の課題のひとつと位置付けている。

4. 結論

本研究では、2005年9月に発生した妙正寺川流域の氾濫被害を対象として、その再現計算を行った。中野区による被害調査の結果と比較したところ、本解析が概ね妥当なものであることが示唆された。また、各時刻における浸水深コンター図を精査したところ、対象区域内の雨水排除システムによって、一般的には効率よく雨水を運び去ることができると判断された。ただし、降雨強度が想定規模をはるかに超える時間帯に限れば必ずしも十分とは言えず、標高の低い河川沿いの区域に床上浸水も含む被害が生じたことは容易に理解できる結果となった。また、「河川から下水道への逆流」や、「下水道から地上への逆流」という本来想定されていない水の流れが生じていること、これが地上の浸水深を増大させる結果となること、などを解析結果に基づき例を挙げて説明した。こうした逆流現象は、現在の雨水排除システムが抱える負の効果と言うことができ、今後の被害予測や被害軽減対策を考える上で重要である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、東京都建設局河川部より情報の提供を受けた。ここに謝意を表します。また、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）の助成を受けている。さらに、数値解析の準備ならびに結果の整理に当たって秋本健輔君（早稲田大学大学院学生）の協力を得ていることを付記する。

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. 11，51-52，2005。
- 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，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。
- 4) 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，589-594，2004。
- 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，529-534，2007。
- 6) 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，523-528，2007。

(2008. 9. 30 受付)