

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

NUMERICAL ANALYSIS ON A WATER ACCIDENT IN THE ZOSHIGAYA TRUNK DRAINAGE

関根正人¹・青野雅士²・風間大彰²

Masato SEKINE¹, Masashi AONO² and Hiroaki KAZAMA²

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 (〒 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 August 5, 2008, 5 workers drowned in the drainage pipe because of such an extremely heavy rainfall in Zoshigaya, Toshima Ward. The purpose of this study is to investigate how the rainwater can be removed by the drainage system in this area during this rainfall event. As a result of a numerical simulation, it was expected that the accident happened just after the flow depth in drainage pipe at the point attained the maximum value.

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

1. 序論

近年, 地球温暖化の進行とヒートアイランド現象の深刻化の影響を受けて, 想定規模を超える豪雨に見舞われることが多くなった. 2008 年夏には, 多くの地域で集中豪雨が発生し, 結果として愛知県岡崎市では甚大な浸水被害が生じたほか, 兵庫県神戸市の都賀川では急な増水により水難事故が発生している. また, 東京都豊島区でも 2008 年 8 月 5 日に集中豪雨に見舞われており, 豊島区雑司ヶ谷で下水道工事に従事していた作業員 6 名が流され, このうち 5 名が命を落とすという痛ましい事故が発生した. 東京都による事故調査報告書^{1),2)}などによると, 突発的かつ局所的な集中豪雨により, 下水管内で急激な水位上昇が生じたことから, 作業員の退避が遅れたものと考えられている.

本研究では, この雑司ヶ谷における水難事故が発生した原因を水理学的観点から探ることを一つの目的とする. ここでは, 著者らによるこれまでの数値解析モデルを基本とし, これに後述するような修正を加えたものを適用することによって, 上記の氾濫現象に関する再現計算を行った. 著者らはこれまで, 主として高層ビル群が林立する高度に都市化さ

れた地域における内水氾濫を対象として解析を行ってきた. このような地域の場合には, 道路で囲まれたいわゆる街区にビル群が林立しており, ここに降った雨はしばらくの間ビル内に貯留されと考えられるため, 道路上に降り注いだ雨のみを対象とした解析であっても十分と判断してきた. これに対して, 本研究で対象とする地域の場合には, 住宅密集区域がかなりの面積を占めるように広がっており, この区域を貫くように延びた幹線下水道において事故が発生した. 街区が住宅密集区域である場合には, 建物に降り注いだ雨は貯留されることなくある時間だけ遅れて下水管の中に流入することになる. そこで, 本研究では, 住宅地に降った雨が下水道へ流入するプロセスを簡易にモデル化し, この影響を加味した解析が可能となるように解析モデルを修正した. なお, このような住宅地から下水道への雨水の流入を考慮した内水氾濫解析については, 最近, 川池ら³⁾によっても試みられている. 住宅区域がある比率を超えて存在するような「都市域の内水氾濫現象」について考える場合には, このような住宅地に降った雨が下水道へ流入するプロセスが重要であり, これを考慮に入れた解析が必要となるといえる.

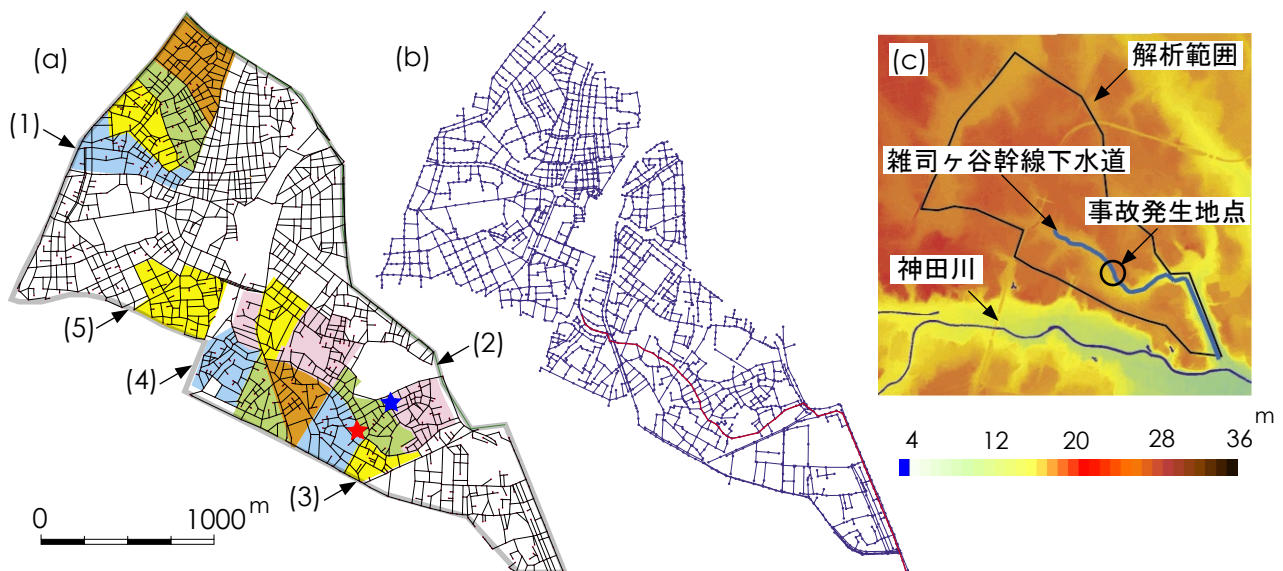


図-1 解析対象区域の概要：(a) 道路ネットワーク図，(b) 下水道ネットワーク図，(c) 標高のコンター図：道路ネットワーク図に着色した部分が住宅区域を表す．本研究ではこの区域を合計 15 の住宅エリアに分割して考えており，その各々を 5 つに色分けして示してある．対象区域の境界は，(1) 山手通り，(2) 首都高速 5 号線，(3) 目白通り，(4) JR 山手線，(5) 西武池袋線であり，図中の★印が事故発生地点を，★印が雨量観測所を表す．また，下水道ネットワーク図中には事故の発生した雑司ヶ谷幹線下水道が赤色の太線で示されている．

2. 解析概要

(1) 解析対象区域と降雨データ

本研究で解析の対象とするのは，図-1 に示される約 4 km × 3 km の区域であり，その地上境界は図中に記載の通りである．図-1(a) には本研究で解析に用いた道路ネットワーク図を，また図-1(b) には下水道ネットワーク図をそれぞれ示してある．また，図-1(c) にはこの区域を含む広い範囲の標高のコンター図を色分けして示した．この区域には，池袋駅を中心とした商業地域が含まれており，中高層のビルが林立する高度に都市化された区域がある．一方，この区域と境を接するように中低層の住宅区域が広がっており，ここにおいても建物が密集しており，空地は見られない．唯一の例外は，雑司ヶ谷霊園や大学をはじめとした学校であり，その面積が全体に占める比率はきわめて低い．また，この地域の地形は，地表標高コンター図からもわかるように全般的にほぼ平坦といえる．ただし，一部の区域に相対的に標高の低いところがあり，ここを貫くように幹線下水道が敷設されている．この幹線下水道は，図-1(a) 中に着色された住宅区域のうちの一方に降った雨水を集めて，地上から排除する機能を持たされており，ほぼ北西から南東に向かって延びている．2008 年 8 月の水難事故はこの幹線下水道の中で発生している．本研究では，この幹線下水道への雨水の集中がどの程度のものであったのか，という点に注目している．

本解析では，事故発生地点から 150m 離れた東京都下水道局豊島出張所で計測された雨量データを用いた．その詳細は，後掲の図-2 を参照されたい．この降雨の特徴は，降雨開始 20 ～ 25 分後のわずか 5 分間に 10 mm を超える強い降雨が記録されていることからわかるように，想定を遙かに超える豪雨であったといえる．東京都が下水道設計時に用いている 1 時間当たりの降雨強度は 50 mm であり，この雨が実際に 1 時間にわたって一様に降り続いたとして 5 分間当たりの雨量に換算するとその値は 4.16 mm となる．この数値と比較すると，上記の雨がいかに激しいものであったかが想像できよう．また，11:50 ～ 12:15 ならびに 12:35 ～ 13:00 の時間帯にはこの数値を超える強い雨が降っていたことになる．そして，降雨開始から約 1 時間 50 分後に一連の降雨が終了している．この度の水難事故は 12:20 (降雨開始から 40 分後) 頃に発生したとされ，これは前述の極めて強い雨が 5 分間にわたって降り続いた直後といえる．本解析では，以上のことを考慮して，降雨が開始した 11:40 から 2 時間にわたって計算を行うものとした．

(2) 数値解析モデル

(a) モデルの概要

本研究では，著者らのこれまでの都市氾濫解析モデルを基本として，これに修正を加え拡張を図ったモデルを適用する．このモデルでは，地上の区域を道路とそれ以外の街区とに分けて取り扱っており，

これまでは道路上に降った雨の流動によりどのような氾濫が生じるかに注目してきた。たとえば東京新宿や渋谷のような高度に都市化された地域の場合⁴⁾には、街区が高層ビルで埋め尽くされており、ここに降った雨は基本的には建物内に一時貯留されてから下水道に流出されるため、このような解析で十分に意義ある結果が得られると判断している。これに対して、本研究で対象とする地域は、(a) 高層ビル群が林立する区域、(b) 住宅区域（図-1(a) 中の色分けされた部分）、(c) 公園や墓地・霊園などの空地、の三つに大別される。特に(b)が加わるものの影響は大きいと考えられる。すなわち、内水氾濫を考える場合には、個々の住宅地内のわずかな隙間をぬうような流れは無視できるとしても、中低層の建物に降った雨が時間遅れをもって下水道に流入する影響については考慮に入れることが望ましい。近年、たとえば東京都墨田区では各家庭に「雨水タンク」の設置を推奨しており、各家庭での雨水の貯留が進められつつある。住宅地に降った雨を無視するとした解析は、このように各家庭で雨水が完全に貯留されることを前提としていることになるが、事故が発生した2008年時点の対象区域に関して言えば実情に合わない設定といえる。

基本となる数値解析モデル^{4), 5)}の概要について、以下に説明する。この解析は、大きく分けて道路ネットワーク上ならびに下水道ネットワーク内の水の流れの解析と、雨水ますを介した両者の間の水のやりとりに関する解析とからなる。道路上の流れの解析には前出の図-1(a)に示した道路ネットワークを、下水道内の流れの解析には図-1(b)に示した下水道ネットワークを、それぞれ用いた。道路に関しては、対象範囲内にあるすべての道路の長さ・道路幅ならびに交差点の位置・標高のデータを数値化したデータベースを、下水道に関しては、すべての下水管を対象としてその長さ・内径ならびに相互の結節点位置・標高を数値化したデータベースを、それぞれ作成し、これに基づき解析を行った。「道路上に降り注いだ雨水を下水道に取り込むプロセス」に関しては、道路側方に約20 m おきに設置されている「雨水ます」を介して行われている。そこで、現実に対応した解析を行うため、雨水ますを直径0.5 m、高さ0.8 m の円筒とし、その上面が地表面に接し、その底面付近で下水管とつながる管渠が取り付けられているものとして、雨水ますの効果を考慮した。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。なお、解析に当たっての初期条件については、道路上、下水道内ならびに雨水ますの中はドライの状態にあるとした。しかし、下水道内には、降雨発生時点ですでに0.15 m 程度の流れがあったのではないかと情報の情報もあり、これが事実とすれば初期水深の分だけわずかに流量を過小評価して計算を始めたことになる。また、下水道内の流れに対する境界条件については、簡単のため以下の通りとした。対象区域の外部へとつながる下水道の計算点においては、満管状態の流れとはならないことを確認した上で、管路勾配に見合った流量が流出するものとした。

(b) 住宅区域に降った雨水の新たな取り扱い

解析モデルを修正・拡張するにあたっての基本的な考え方は、以下の通りである。前述の区域(a)に降った雨についてはこれまで通り考慮しない。区域(c)に関しては、空地からの氾濫水が道路上に流れ出る、あるいはその逆の流れが生じる可能性がある。これを考慮する方法についてはすでに検討し、これを組み込んだ解析も行っている⁵⁾。しかし、ここで注目する事故発生地点付近にはこのような空地はなく、かなり離れた位置に霊園があるにすぎない。そこで、その影響については無視できるものと判断し、区域(c)に降った雨水についても考慮しないことにする。従って、本研究では、区域(b)の住宅地の建物上に降った雨が下水道内に直接流入する現象のみ注目し、この影響を新たに加味することにした。

住宅地に降った雨の下水道への流入については、次のように簡略化して考える。ここでは、個々の住宅地からの流出を考える代わりに、住宅地域をより大きな規模のエリアに分割し、エリア毎に平均化してその流出を考えることにする。また、実際の流出のプロセスは、建物に降った雨が屋根から樋を経て宅地の地下に運ばれた後に下水管に入るようになるが、ここではあえてこの輸送プロセスを力学的に解くことはせず、建物に降った雨がエリア内にある下水道計算点に一樣に流れ出るものとした。本研究で対象とする区域には、大きく分けて図-1(a)に着色して示された二つの住宅地域があり、このうち規模が大きな南側の住宅地域を通る雑司ヶ谷幹線下水道において事故が起きている。本研究では、これらの区域を合計15(このうち南側の地域を11)のエリアに分割した。次に、各エリアの総面積からここに含まれる道路面積を差し引いて、エリア毎の一般住宅地面積を求め、これを A_0 とする。また、これらの区域の建ぺい率 α_k が概ね60%であることから、一般住宅地面積に建ぺい率を乗じた面積 $\alpha_k A_0$ が建物面積 A に相当する。さらに、ここでは建物の屋

根に降った雨が一定時間 T_r だけ遅れて下水道に流出してくるものと仮定する．このとき，時刻 t においてこのエリアから下水道内に流入する流量は $r(t - T_r) \times A$ に相当することになる．ここに， $r(t - T_r)$ とは t から T_r だけ前の時刻の降雨強度ということになる．さらに，このエリア内にある下水道計算点の数を N_p とすると，この流量を N_p で除した $Q_r = r(t - T_r) \times A / N_p$ が，エリア内の下水道計算点を中心としたコントロール・ボリュームに流入する流量ということになる．そこで，このコントロール・ボリューム内の体積保存の関係から管内の水深を計算する際に，この量 Q_r を加算することにした．ここでの取り扱い，下水道の解析モデルなどと比べるとかなり単純なものであり，モデルの間の精粗のバランスに問題があるともいえるが，パラメータとなる遅れ時間の取り方によっては量的に大きな間違いは生じないと判断しており，ここではあえてこのような簡易的な取り扱いで解析を試みた．これにより，住宅地に降った雨が下水道にとってどの程度の負荷となるかが理解できるとも考えている．ただし， T_r がどのような値となるかは現時点で定かになっておらず，今後の課題と位置づけている．

3. 結果と考察

まず最初に，本解析で導入したパラメータである遅れ時間 T_r について，解析結果を踏まえて検討を加える．図-2 は，解析に用いた実測の降雨ハイトグラフと，解析により得られた下水管内の水深の時間変化を示したものである．本解析では下水管を断面積が等価な正方形に置き換えて解析しており，その一辺の長さを H と定義している．図の縦軸は，事故発生地点の管内水深 h をこの H で除した相対水深を表し，この値が 1 になると満管状態での流れが生じていることを表す．図中には，遅れ時間 T_r を 5 ～ 20 分の範囲で変化させたときの水深ハイドログラフが示されている．東京都によれば，事故が発生したのは 12:20 頃とされ，そのときの下水管内の水深は 1.4 m (相対水深としては 0.9) であったと推定されている⁹⁾．図-2 を見ると，当然のことながら 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．この図からわかることは以下の通りである．

(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．一例として， T_r を 15 分とした場合の結果を見ると，事故発生 20 分前

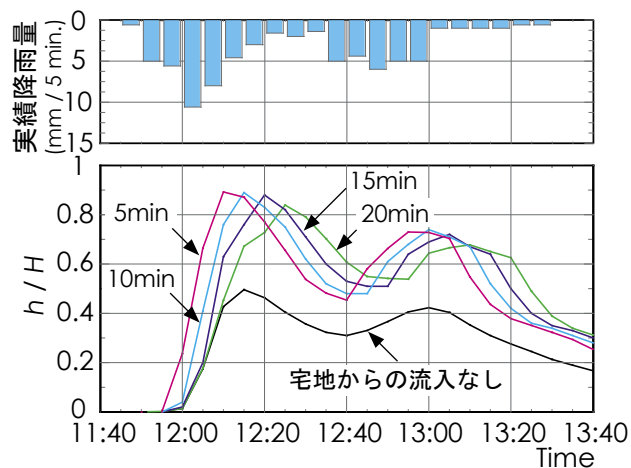


図-2 実測された降雨ハイトグラフと事故発生地点における下水管内の相対水深 h/H の時間変化：上段の図の縦軸は 5 分間当たりの降雨量を表し，下段の図中の数字は遅れ時間 T_r を表す．

の 12:00 から 12:10 までの 10 分間に h/H の値が 0.0 から 0.6 まで増加している．これは事故発生地点の水深が 0.9 m 以上も増加したことを意味する．

(2) 遅れ時間 T_r が 5 ～ 15 分程度であるとすれば，事故発生地点での 12:20 の相対水深は 0.9 以上程度となり，東京都による推定値⁹⁾ とほぼ一致する．

(3) 図中の黒の実線は，著者らの従来の計算法による結果であり，相対水深の最大値は 0.5 程度に止まる．このことは，住宅地域から下水道に入り込む雨水の量は，下水道にとっては無視し得ない大きな負荷となることを意味する．言い換えると，もし，各家庭での雨水貯留が進むならば，下水道内への負担を劇的に軽減させることができ，ひいては内水氾濫の発生すら回避できる可能性がある．

次に，この区域内での内水氾濫現象そのものについて見ていくことにする．ここでは，図-2 の結果を踏まえて，図-3 以降には T_r を 15 分とした場合の解析結果を例として示す．なお，この条件下で得られた流速の予測値は，事故発生地点で 12:20 において 3.3 m/s であり，東京都による推定値⁹⁾ である 3.6 m/s に近い値であった．図-3 には，数値解析結果をまとめて示した．図の左側が道路上の浸水深のコンター図であり，右側が下水道内の相対水深のコンター図である．図には，降雨開始時刻である 11:40 から 10, 20, 30, 40 分後の結果が示されている．この図より，次のことが見て取れる．

(1) 降雨開始から 30 ～ 40 分が経過するにつれて道路上の浸水深は増大する．しかし，最大でも 30 cm 程度であり，顕著な浸水被害は生じ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) これに対して，下水道内の水深の増加は顕著で

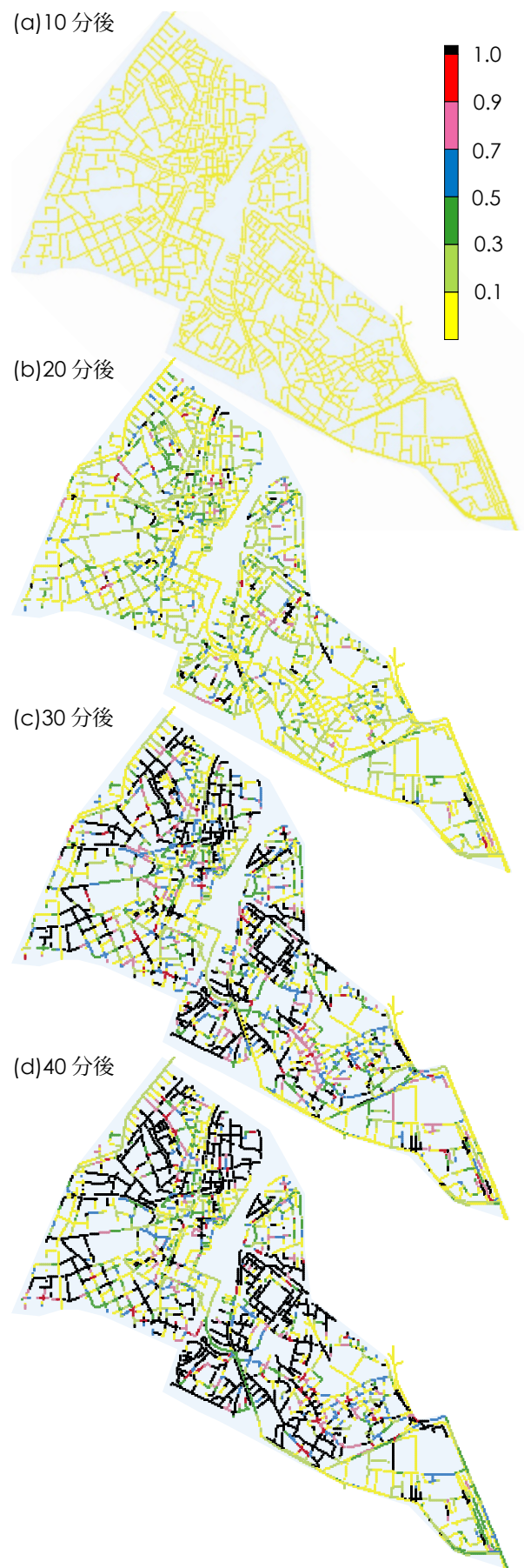
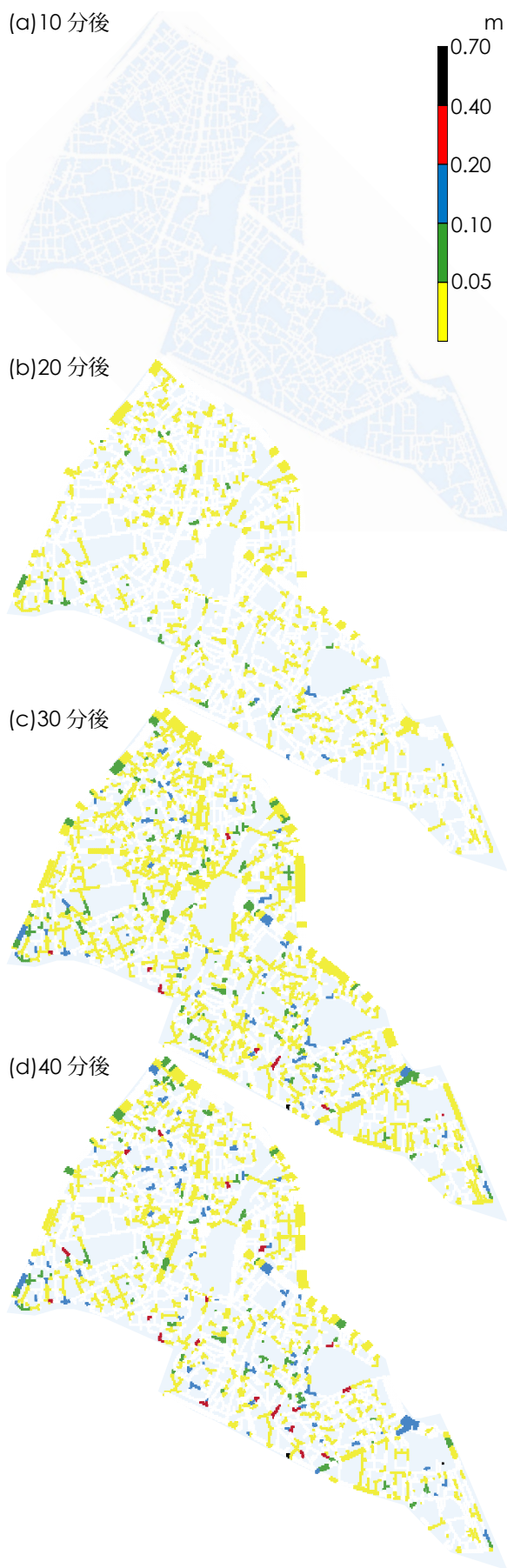


図-3 道路上の浸水深コンター図と下水道内の相対水深 h/H のコンター図：ともに一般住宅地の屋根に降った雨が下水管まで到達する遅れ時間を 15 分とする。(a)～(d) は降雨開始からの時間を示す。



図-4 道路上の浸水深コンター図と下水道内の相対水深 h/H のコンター図：住宅地域に降った雨が下水道に流入することはないとした条件での解析結果（降雨開始から40分後）

あり、少なくとも30～40分の時間帯にはいたるところで満管状態の流れとなっていた可能性が高い。別の見方をすれば、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のは降雨開始から20分かそれ以前までと推察され、中止にはきわめて速やかな判断が必要であったことも示唆された。

図-4には、著者らの従来の計算法による結果を参考までに示してある。これは、前述の通り、住宅に降った雨はすべて各家庭で貯留できるとした解析に相当する。図-4に示されているのは12:20時点での道路上の浸水深ならびに下水道内の相対水深のコンター図である。図-3(d)と比較すると、道路上の浸水深には大きな違いが見られないのに対して、下水道内の水深には顕著な差が見て取れる。

4. 結論

本研究では、2008年8月に東京都雑司ヶ谷で発生した集中豪雨による水難事故の原因を水理学的に究明するために、数値解析による検討を行った。事故が発生したとされる12:20までの25分間に注目すると、この間の降雨量は下水道の設計降雨強度から換算される5分雨量を大きく上回る豪雨であった。このため、この雨水が流入する幹線下水道では急激に水深が増加し、わずか10分間で0.9 m以上というスピードで増水することとなったと推察される。このたびの水難事故はこうした状況下で発生したことが水理学的に理解された。

この解析に当たり、著者らの街路ネットワークモ

デルとでもいえるべき都市洪水氾濫予測モデルに以下のような修正を加えた。すなわち、住宅地域に関しては、その屋根に降り注いだ雨水が比較的速やかに下水道に流出すると予想されることから、簡単な取り扱いとはいえこれを考慮に入れた解析となるようにした。遅れ時間 T_r をどのように設定すべきかなど、今後課題を残している。これについては現在検討中である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、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）の助成を受けた。

参考文献

- 1) 東京都下水道局：雑司ヶ谷幹線再構築工事事故報告書，2008。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) たとえば，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。
- 5) 関根正人，秋本健輔：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，水工学論文集，第52巻，859-864，2008。
- 6) <http://www.nikkeibp.co.jp/news/const08q3/581742/>。

(2009. 9. 30 受付)