

新宿駅周辺を対象とした内水氾濫ならびに 地下街浸水過程の数値シミュレーション

NUMERICAL SIMULATION OF INUNDATION PROCESS IN DOWNTOWN SHINJUKU

関根正人¹・河上展久²・安武弘道²・三好 裕²

Masato SEKINE, Nobuhisa KAWAKAMI, Hiromichi YASUTAKE and Yuh MIYOSHI

¹正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

²学生会員 学士(工学) 早稲田大学大学院 理工学研究科 (同上)

The expanding process of inundation damage in urban area was investigated in the present study. Simplified numerical simulation models were constructed on the basis of diffusion wave approximation to understand hydraulically the process itself and to estimate the magnitude of damage. Hazard map in the area of downtown Shinjuku was the most important information presented in this paper. Some suggestion on the underground space was also described here. Consideration about the arrangement of stairs connected between the floors in this space are indispensable to make the inundation damage be minimum.

Key Words : *inundation process, underground space, heat island, numerical simulation, downtown Shinjuku*

1. 序論

近年,都市への人口と資産の集中が急速に進み,いわゆる「都市化」が進むことによって,都市域の環境は悪化の一途をたどってきた。1950年代以降,この都市化に伴い,水田や湿地の宅地化や地表面の舗装化などが進み,雨水の地表における貯留あるいは地下への浸透が著しく阻害されるようになったことから,「都市水害」と呼ばれる水害を招くことになった。一方,都市の環境の変化に目を向けると,地表面からの水分の蒸発が生じ難い状況にあることから湿度の低下を招き,また,ビルや舗装道路が増加し,これらが太陽熱を蓄えることによって地表の温度の上昇を招くことになった。これがいわゆる都市の「ヒートアイランド」化であり,これに伴い新たな水害の危険性を生むことになった。ヒートアイランド現象は最近10年で顕在化してきており,地表付近で暖められて軽くなった空気が都市上空に向かって上昇することで雲が形成され,これが移動しながら大量の雨を降らすために,都市域では夏季にゲリラ的な集中豪雨に見舞われるようになってきている。気象庁によると,1時間に100mmを超す激しい雨の発生件数は,1990年前半には全国で年間0~2回程度であったものが,

1999年には10回,2000年には6回となるなど増加の傾向を見せている。従来の水害の主たる原因は台風や梅雨であり,1日程度かそれ以上の時間スケールで対策を考えるべきものであったのに対して,こうした豪雨は数時間程度と時間スケールは短いものの降雨強度は従来に大きく大きいという特徴をもつ。そこで,前者を原因とする降雨に対して必要十分であることを目指して整備を進めてきた都市の下水道網による排水システムが,後者の集中豪雨に対しても十分に機能するとは言い切れない。

一方,都市では,空間の高度かつ集約的な利用の観点から地下空間の開発が進み,大都市の地下には地下街や地下鉄が縦横に延びている状況にある。また,最近の建築基準法の改正によって地下室を備えた住宅の建設も進んでいる。こうした地下空間はその利用目的ゆえに地上からのアクセスが容易であるように作られており,ひとたび地上が内水氾濫に見舞われると,その水が地下空間へ流れ込み,更なる被害の拡大を招くことになる。地下空間の浸水被害の事例について見てみると,表-1のようになる。最近では,1999年に福岡県博多駅周辺の地下空間が深刻な浸水被害を受け,不幸なことに人命まで失われることとなった。また,2000年の東海豪雨の際にも地下鉄を

表-1 地下空間の浸水被害：文献¹⁾より引用

種類	発生日月	発生場所	最大時間雨量
地下鉄	1973年 8月	名古屋市営東山・名城線 平安通駅	80 mm/hr
	1981年 7月	都営三田線 内幸町駅	68
	1985年 7月	都営浅草線 西馬込駅	
	1986年 8月	仙台市営	
	1987年 7月	京阪電鉄	70 + 78
	1989年 8月	都営浅草線 五反田駅	70
	1995年 8月	営団丸の内線 赤坂見附駅	
	1999年 6月	福岡市営 博多駅	77
	1999年 8月	営団半蔵門線 渋谷駅 営団銀座線 溜池山王駅	
	2000年 9月	名古屋市営名城線 平安通駅 桜通線 野並駅 鶴舞線 塩釜口駅	93
地下街	1970年 11月	八重洲地下街	
	1971年 7月	名古屋駅前ユニモール	30
	1981年 7月	新宿歌舞伎町サブナード	
	1982年 8月	名古屋市セントラルパーク	33
	1999年 6月	福岡市博多駅、天神	77
	2000年 9月	名古屋駅前ユニモール 名古屋市セントラルパーク	

はじめとした地下空間の広い範囲にわたって浸水の被害が生じたことは記憶に新しいところである。こうした被害の実態に関しては末次¹⁾の論文に詳しく説明されており、その中で、これらの地下街の浸水は時間当たり概ね70mmを越える豪雨に対して生じていること、この程度の雨の発生はそれほど稀なものではないことなどが報告されている。このように、都市の豪雨に対する脆さが明らかになり、あわせて地下空間の危険性も認識されるようになってきている。

このように、東京をはじめとした大都市は、従来の想定とは異なる集中豪雨に見舞われる可能性が高まり、その規模がさらに増大すると、深刻な内水氾濫を引き起こす恐れがある。その場合には、その下に広がる地下空間においてもさらに危険な事態を招くことが懸念される。これに対して、河川の決壊等に起因する氾濫については、既にハザードマップが作成・公表され、住民への周知も進んでいるが、たとえば、東京新宿などの河川から離れた都市の繁華街における内水氾濫に関しては、住民・利用者ともに十分な情報をもっていないのが現状である。また、地下街に関しては、商業用空間であることから建築基準法と消防法の規制を受け、人と物の流れと利用しやすさに配慮して設計され、ここに水が流入することは想定されていない。そこで、ひとたび浸水被害が発生した場合に利用者が安全かつ迅速に避難するために必要となる情報については十分に得られていないのが現状である。

こうした点に鑑み、本研究では、新宿駅周辺の繁華街を対象として、内水氾濫が生じるプロセスならび

に被害の規模を評価することを目的として数値予測を行った。そして、この結果を基に、対象区域におけるハザードマップ(湛水深の時空間分布)を試作した。また、この結果を踏まえて、この地域の下に広がる地下街への浸水被害拡大の過程についても明らかにしている。

2. 数値解析モデル

本研究では、図-1(a)に示す新宿駅周辺の太線で囲まれた範囲を対象として内水氾濫解析を行う。この区域は、東西南北にほぼ各1 kmの辺を持つ正方形の形をしており、その中央をほぼ南北にJR山手線が、東西に靖国通りが貫くように通っている。この両者の交点に当たる部分は「大ガード下」と呼ばれ、道路が線路下をくぐるような構造になっているため、この部分の路面は周囲より1.5～2m程度低くなっている。この対象区域は「すり鉢」状の地形になっており、その最深部がひとつはこの大ガード下付近に、もうひとつが靖国通りの東北東に広がる「歌舞伎町」のほぼ中央付近にある。そこで、解析領域の境界については、こうした地形の特徴を利用して、このすり鉢の縁に当たる幹線道路上にとることにした。

まず最初に、この区域内に想定される水害のうち最悪のシナリオについて考えておく。前述の地形的な特徴から判断して、この区域を豪雨が襲うと、その水は標高の低い大ガード下と歌舞伎町の中央部へと集中することになり、万一、この区域の下に広がる「新宿サブナード」と名づけられた地下街に氾濫した水が流入することになれば甚大な被害が生じる。この地下街の場合は、1981年に浸水被害を起こしているが、その際にも大ガード下付近にある地上から地下への連絡階段から雨水が進入しており、この連絡階段付近が地下街にとっての最大の弱点になっている。そこで、豪雨の規模が増し、大ガード下付近の湛水深がある限度を越えたと、地下街の浸水という最悪の事態も起きかねない。本研究では、こうしたシナリオが現実のものとなる可能性がどの程度あるのかを判断するとともに、こうした内水氾濫被害が拡大するプロセスについての理解を深めることを目指す。さらに、地下街の浸水被害が拡大していく過程についても検討する。また、本来、雨水を排除する役割を担うものとして「下水道網」が完備されているが、豪雨に伴う内水氾濫の際にはこれがあまり機能しないとの指摘もある。そこで、解析の第一歩として、本モデルにおいては下水道網による効果を考慮に入れていない。しかし、下水道網がどのように機能するのかについては当然検討する必要があり、全てを考慮に入れた解析については今後早急に行っていく予定であるが、ここでは、対象区域に敷

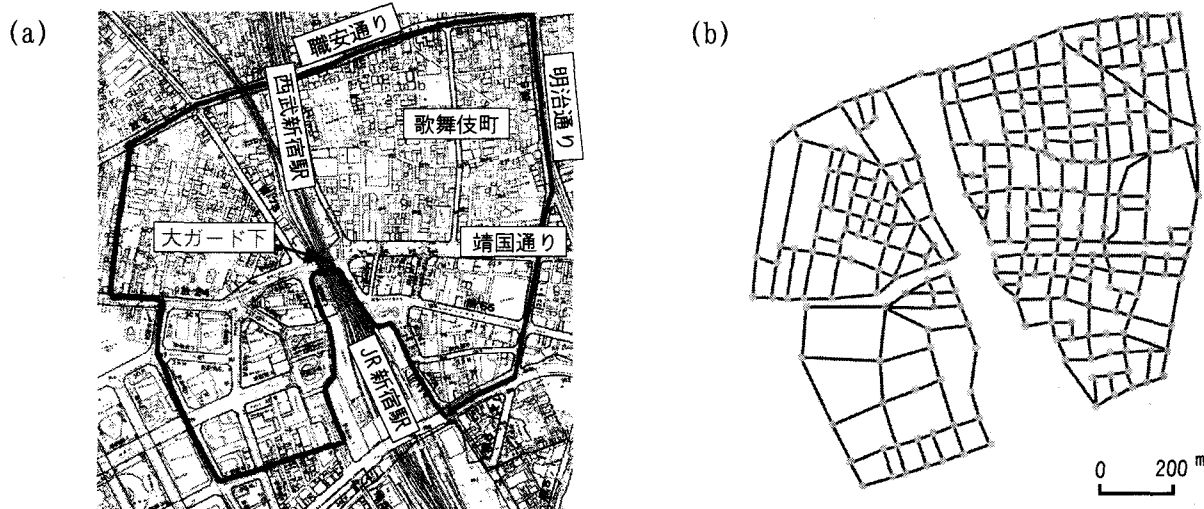


図-1 計算対象領域:(a)道路網,(b)計算格子網

設されている下水道網がシステムとしてどのような排水特性をもっているのかについて、簡単な考察を加えておくことにする。

このように、本研究で開発した解析モデルは、地表における内水氾濫モデル、下水道網による雨水流出モデル、地下街の浸水モデル、の3つに分けられる。各々のモデルは、拡散波近似の考え方にに基づき、Manningの平均流速公式と連続式とを組み合わせで解くというものである。地下街の浸水モデルに関しては前報²⁾で報告済みであることから、ここでは、それ以外について簡単に説明を加えておく。まず地表の内水氾濫の計算の概略は以下の通りである。すなわち、(1) 計算は図-1(b)に示されるような計算格子網を対象に行い、格子点は全て道路の交差点に配置されている。図に表された格子点間の線は、氾濫水が滞留あるいは流下する道路を表しており、計算では各格子点における水深の時間変化を求める、(2) 道路に囲まれた区域には高層のビル群が林立するが、このビルに降った雨については地表流となることなく下水道に入るため、道路網の上に降った雨のみ考慮する、(3) 中央分離帯のある幹線道路に関しては左右別の道路として取り扱い、交差点において相互に連結するものとする、(4) 大きな窪地のような構造になっている「大ガード下」に関しては、左右両側から流入があるプールのように取り扱う、などである。一方、下水道網による雨水流出計算に関しては、後掲の図にあるような下水道ネットワークに対して、各下水管が接続されているマンホール設置位置に計算格子点を設け、その点における水深を地表流の計算と同様に求めていく。なお、道路網ならびにこれを構成する各道路の幾何学的情報や交差点における標高、さらには下水道についての同様の関連情報については、全て現実のデータを与えている。

3. 内水氾濫ならびに地下街浸水過程

(1) 内水氾濫過程に関する考察

本研究で解析の対象とした降雨は、図-2に示すような平成11年7月21日に東京練馬で実際にあった記録的な集中豪雨である。計算は雨が降り始めた15:00から雨が止んだ17:00までの2時間にわたって行った。計算に当たっては、Manningの粗度係数を0.3とし、時間刻みを0.05秒としている。解析結果を図-3、図-4および図-5にまとめて示す。図-5には、粗度係数を0.05～0.5の範囲で変化させて別途行った計算の結果も併せて示してある。まず、図-3は、降雨開始から60分後、90分後ならびに120分後における氾濫水の水深の大小を色の濃淡で表したものであり、いわゆるハザードマップに相当する。また、図-4には氾濫被害が拡大していく過程における流向のパターンを示している。この図より、雨水は「大ガード下」と歌舞伎町中央付近の点(1丁目と2丁目の境界上に位置する交差点)に向かって道路上を大きく流動するというパターンをとることがわかる。さらに、図-5には、大ガード下における水深の時間変化を示している。この図より、想定される粗度係数の範囲内のいずれの値に対しても、この地点の浸水深が2 mを越える結果となることがわかる。大ガード下の標高と連絡階段の入り口の高さとの差が2 mを下回る程度であることを考えると、降雨開始から60分程度の時間の後に地下街への浸水が始まる可能性があることになる。一方、歌舞伎町について見てみると、水深が0.3mかそれ以上のところが多く見られる。これは、その付近が勾配の急な坂道の谷底に当たる地形になっているためであり、しかも標高もかなり低い。この付近は各種店舗が軒を並べる過密な商業地区であり、多くの建物では地下空間が利用されている。そのため、この地域に水深0.3mから深いところで0.7m以

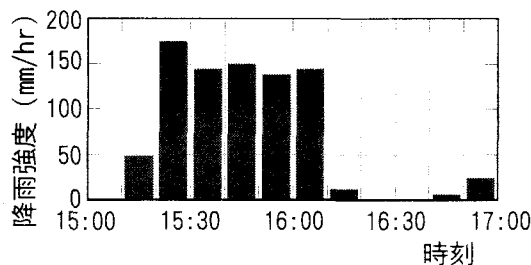


図-2 解析対象とする降雨データ

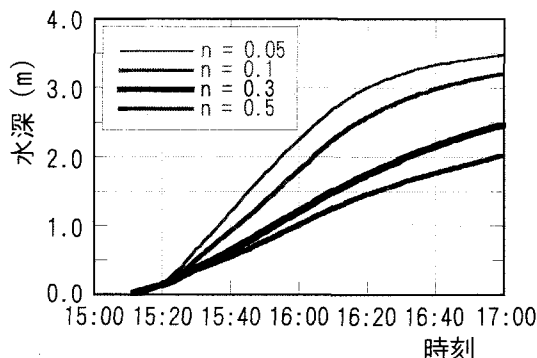


図-5 大ガード下における水深の時間変化



図-4 氾濫水の水深の時間変化

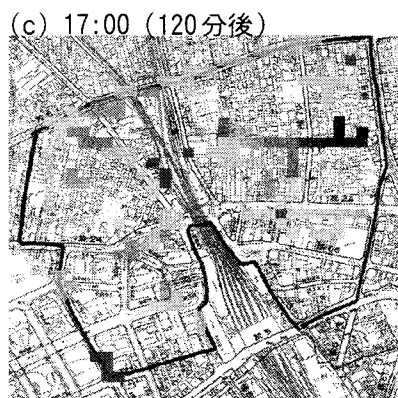
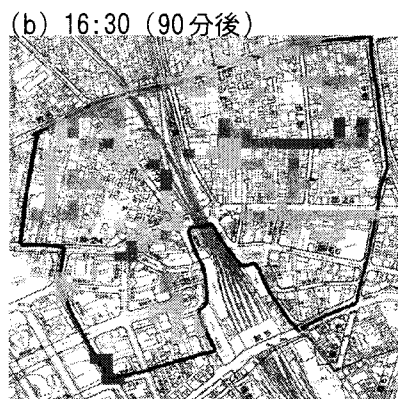
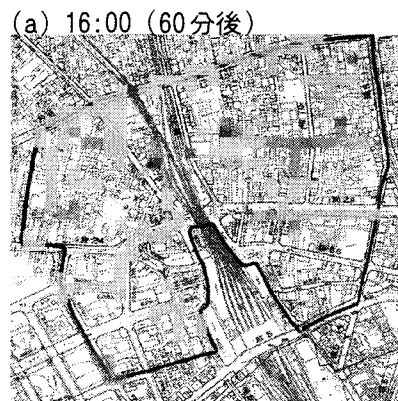


図-3 氾濫水の水深の時間変化

上にも及ぶ浸水が生じるとすれば、これらの地下空間にも深刻な被害が発生することが予想される。また、この付近の路上における90分後流速を求めると0.1～0.2m/sec程度であり、大人の膝から腰に至る程度の水深であることを考えると、流れに逆らって避難することは容易ではないこともわかる。

次に、これと関連する問題である「この区域の下水道網の特性」について簡単に説明しておく。この地域の下水道網のうちJR山手線の内側(東側)部分についてだけ記したのが図-6である。下水道網を構成する各管は勾配をつけて設置されているため、流れは概ね図中の淡色の三角形の記号が表す向きに生じると考えることができる。図-6には、試みに図中の点(a)の大ガード下にある側溝から雨水が下水管に流入し、その浸水深が時間によらず0.5mであるとした場合の雨水の流入・排出過程を調べた結果を示した。計算に

当たっては、初期条件として下水管内にDry Conditionを適用し、Manningの粗度係数については試みに0.01とした。図-6の○印は、下水道内に水が流入し始めてから60分後の主要な格子点における水深を色分けして示したものである。この図からもわかるように、この下水道網の中に入った水は、流入地点を問わず必ず図中の点(b)～(d)を経由してこの区域の外へ排出される。注目すべき点は、ここで特に大きな水深になると予測された点(c)～(d)の区間が、図-3に示された歌舞伎町における浸水深の大きな区間と一致することである。このことは、解析対象区域内で下水道網に入った雨水は、地表の浸水深が最大となるこの部分の地下の下水管に向かって集められることを意味し、この大量の地表の水がこの区間から下水管内に入ると、管内の疎通能力が著しく低下するだけでなく、その影響は下水道網全体に及び、豪雨時に

は下水道網はほとんど機能しなくなる恐れもある。さらに、この点(c)～(d)の区間に関して言えば、地表の水を排出するよりはむしろ下水管からこの区間の地表に向かって逆流を起し、内水氾濫被害を助長する可能性もある。こうした点を考慮した上での対策か否かは定かではないが、この区間には管径の大きな下水管が敷設されている。実際に上記のような事態に至るか否かについては今後の更なる検討が必要であるが、こうした危険を内在していることは確かである。このほか、別途行った解析の結果によれば、点(a)から点(b)に至る靖国通り下の下水管についてはその勾配が緩やかであるために、対象区域内の他の地点から流入した水が容易に大ガード下の点(a)に至ることもわかっている。このことは、下水道網自体が大ガード下からの雨水を速やかには排出しにくい構造になっていることを意味する。

(2) 地下街浸水過程に関する考察

最後に、地下街の浸水過程について見ておくことにする。ここでは、前述の通り、大ガード下付近の連絡階段から地下街に向かっての流入が生じ得るとの前提に立って、その地点の水深が0.5mであるとした場合の解析結果を示す。ここで対象とする地下街は、地下1階と2階とからなる二層構造になっており、この1階部分には8m四方程度を基本とした店舗が通路を挟んで両側に並び、その各々が壁で仕切られた構造になっている。また、地下2階は駐車場として利用されており、両階の間は8カ所の連絡階段で結ばれている。参考までに、地上と地下1階とは全部で18カ所ほどの階段で結ばれているが、前述の内水氾濫計算からすると、浸水を引き起こす可能性があるのはこの大ガード下付近のみと考えられる。図-7には、地下1階および地下2階における解析結果を示しており、それぞれ上段に水深の等値線図が、下段に流速ベクトル図が示されている。この解析の一部は既に前論文²⁾で報告済みであり、この解析結果は概ね1981年の浸水事例をうまく説明するものであることが確かめられている。この結果に基づき、地下街の浸水過程に関して重要と考えられる事項をまとめると以下ようになる。(1) 地下街に生じる流れとしては、その先端部の流速がかなり大きく、局所的には0.15m/secを越えるところもある。さらに、店舗を仕切る壁や柱が各所にあるため、流れは必ずしも一方向とはならず、所により大きく渦を巻くような複雑な様相を呈する。このことは避難行動に少なからず影響するものと考えられる。(2) 浸水被害の拡大は意外に早く、地下1階に関しては浸水開始から60分程度でほぼ全域に及ぶ。しかし、地下2階への浸水については、連絡階段の配置の影響を強く受け、地下1階全体が浸水し、地下2階へ続く全ての連絡階段からの水

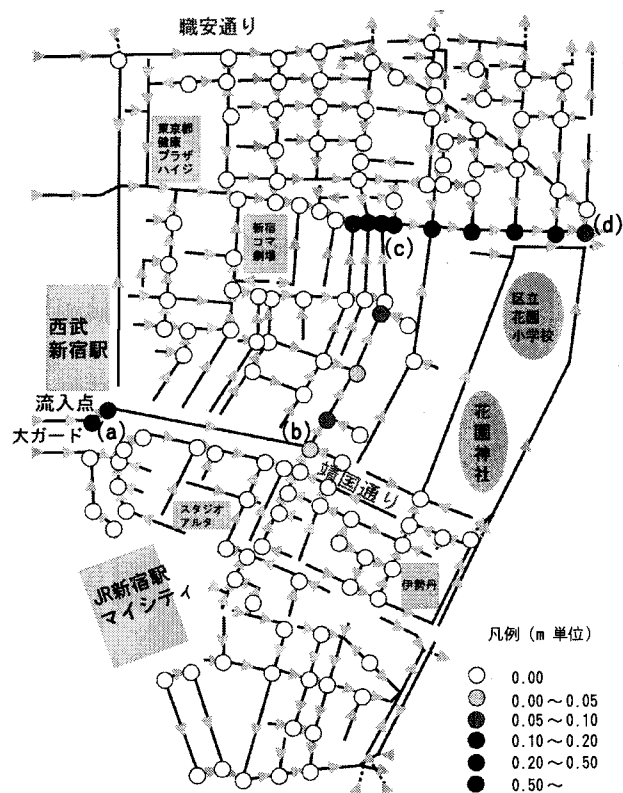


図-6 下水道網からの雨水排出計算例(60分後)

の流入が顕著になる60分後くらいになって、地下2階の浸水規模は加速度的に拡大する。(3) この地下街が二層構造であることの効果について調べたところ、地下2階への流出がある場合には地下1階の被害が軽減されることがわかった。

以上のことを踏まえて、浸水被害を軽減させるための地下街の構造について水理学的に考えてみる。これに関するポイントは、各階を結ぶ連絡階段の平面配置の工夫と、利用客が多い階に進入した水を一時貯留する空間を階下に確保することにあると考える。この新宿サブナードのような地下駐車場を階下にもつ建物の場合には、十分な備えと手当をした上で、進入した水を速やかに地下2階へと誘導することが望ましく、その一方で、水を排出する階段から離れた位置に人が安全に避難できる経路を確保することが必要となる。階段に関しては、浸水時に水路となることを考えて、階段の構造や壁面における水理学的な粗度についても留意することが望ましい。一方、こうした浸水被害が生じた場合には、下水道も満管状態になり、その処理能力一杯の水を輸送していることが予想されることから、これまで設置されてきている排水用ポンプに多くを期待することは不可能である。そこで、被害軽減のためには、進入した雨水を一時貯留する施設が必要であろう。今後新たに地下街を計画する場合には、上記の点を考えに入れるべきである。また、既設のものについては、浸水被害

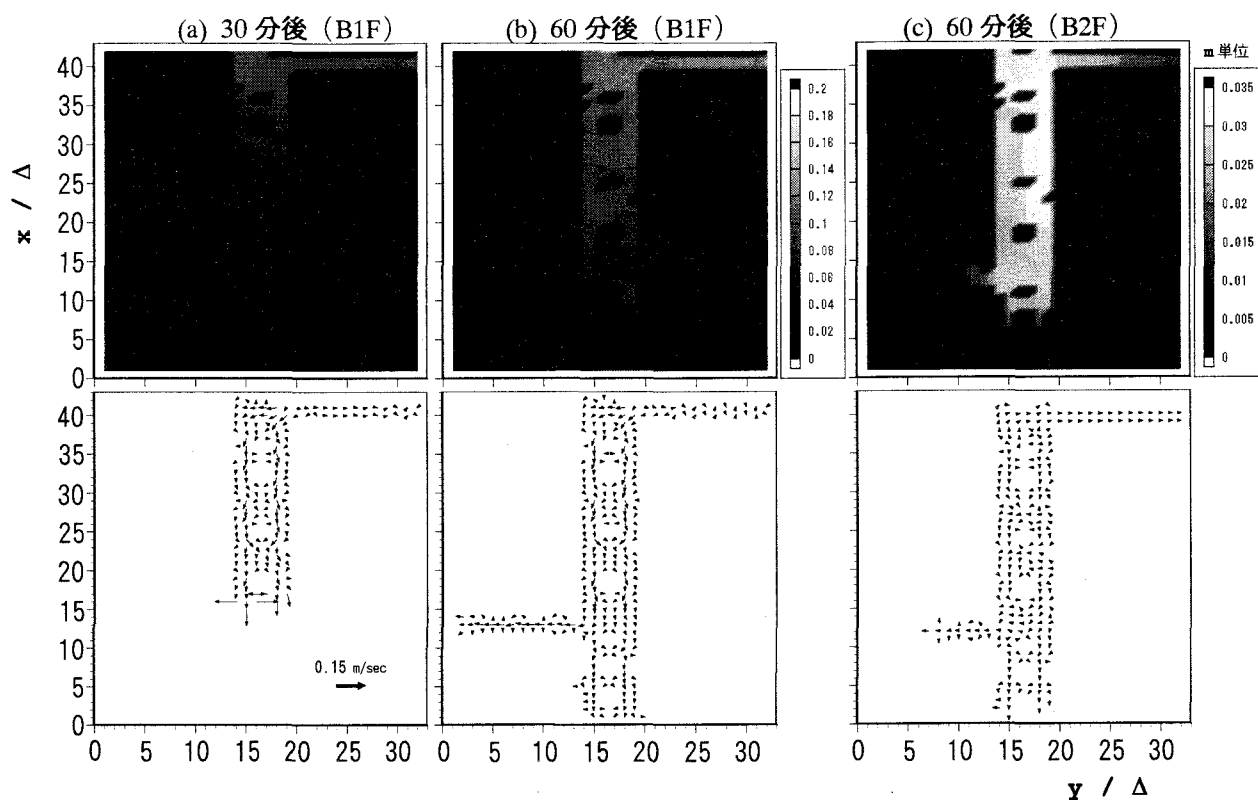


図 - 7 地下街の浸水被害拡大過程 : (a)(b)が地下1階, (c)が地下2階

予測計算を行い、最も深刻な場合としてどの程度のことがあり得るかを知った上で、それを回避するための対策を講じるとともに、その危険の有無を利用者に知らせ、有効な避難活動がとれるよう準備しておくことが必要である。

4. 結論

本研究では、新宿駅周辺の地域を対象にした内水氾濫シミュレーションを行い、浸水被害を受ける恐れのある区域を特定するとともに、その規模を予測した。この結果は、対象地域の下に広がる地下街に氾濫水が流入し浸水被害を起こす可能性があることを示唆するものであった。そこで、地下街に浸水被害が拡大する過程についても数値解析し、その過程についての理解を深めた。さらに、この地域の敷設された下水道網を対象とした雨水の排出計算についても行い、この下水道網がシステムとして持つ特性あるいは問題点について説明した。ここで提示した解析モデルは、広く簡便に利用されることを期待して開発されており、たとえばManningの粗度係数を適切に定めるなど、いくつかの検証が残されている。今後は、モデルの精緻化を進めるとともに、更なる現象の理解に努めていく予定である。

最後に、こうした地下空間の浸水被害対策について簡単に触れる。末次¹⁾による詳しい調査結果によれ

ば、現時点では、連絡口付近にステップや防水扉・防水板を設けたり、標高の低いところに排水ポンプを用意するといったハード面の対策と、万一の場合の速やかな避難を可能にする情報の収集・伝達といったソフト面の対策とが並行して進められつつある。しかし、たとえば建物の電気系統の心臓部が地下空間に置かれたままであるなど、現状の適切な理解と根本的な危機意識とが十分に得られておらず、それが対策を遅らせているのではないかと憂慮している。本論文がこうした現状認識の向上の一助になることを願う次第である。

謝辞：本研究の遂行に当たりを進めるにあたり、東京都建設局の土方氏、同下水道局の許田氏、新宿区役所の吉岡氏、新宿地下駐車場株式会社の飯田氏ならびに栗林氏の協力を得た。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 末次忠司：都市型地下水害の実態と対策，雨水技術資料，Vol.37，7-18，2000。
- 2) 関根正人，前川桂恵三：都市地下空間の浸水被害シミュレーションの試み－新宿地下街を対象として－，河川技術論文集，第7巻，161-166，2001。

(2002. 4. 15 受付)