

都市水害現象のモデリング —その考え方と事例—

戸田圭一¹・井上和也²・大八木 亮³

¹Ph.D. 京都大学助教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²工博 京都大学教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³京都大学大学院 工学研究科 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

1. 緒言

都市水害事象を検討するにあたっては、水理・水文モデルに基づく数値解析手法の活用が有効な手段の一つである。ここでは著者らが近年取り扱っている流域統合型の「都市域の豪雨氾濫モデル」の考え方とその京都市内域への適用事例を紹介する。また最近注目されている地下空間の浸水に対する実用的な解析法、ならびにその大阪市内の地下空間への適用事例についてもあわせて示すこととする。

2. 都市域の豪雨氾濫解析モデル

(1) 全体のモデル構成

「都市域の豪雨氾濫モデル」は、以下に示す 3 個のサブモデルから構成される。

(I) 都市域近郊の山地領域からの流出解析モデル(山地モデル), (II) 市街地を対象とした, 道路網, 市内河川網を組み込んだ氾濫解析モデル(市街地モデル), (III) 市街地の下水道による排水を扱う下水道のモデル(下水道モデル)。全体のモデル概念図を図-1 に示す。

(2) 山地モデル

山地モデルとしては、様々な流出解析モデルの適用が考えられるが、ここでは椎葉ら¹⁾が提案している、kinematic wave モデルを基にした斜面流出計算モデルを用いる。また、流出解析を行うに際しての流域地形の水理表現法に関しては、椎葉ら²⁾が提案している、落水線モデルを用いる。山地モデルの詳細は文献 1) および 2) に譲ることとするが、このモデルにより、対象領域に所定の降雨を入力すれば、山地の最下流端、すなわち後述する市街地モデルの河川の上流端での流出流量を求めることができる。

(3) 市街地モデル

ここで紹介するモデルは、井上ら³⁾が提案した、1次

元のネットワーク手法に基づく氾濫解析法を改良し、道路網に加えて市内河川網をもネットワーク化したものである。本モデルでは、まず、対象領域を道路とそれ以外(建造物や空地などからなり、住区と呼ぶことにする)に分類し、そのうち道路については、交差点をノード、交差点間の道路をリンクとするネットワークを形成する。その際、ノードおよび住区はそれだけで 1 つの格子と考える。また、都市を流下する市内河川も道路と同じように分合流をしており、ネットワークとみなすことが可能である。よって市内河川も、それらを地盤の低い道路と考え、道路ネットワークモデルの中に新たに組み込む(図-2 参照)。また市街地への降雨も、道路(市内河川も含む)、住区への流入流量として扱い、モデルの中で考慮している。

計算においては、リンクでは、以下に示す方程式を支配方程式とする 1 次元解析を行う。ただしリンクに向きを考え、 x 軸を正の向きにとる。また、リンクを 1 次元の長方形断面水路とみなすと、

< 連続式 >

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{q_{in}}{B} + q_{rain} \quad (1)$$

< 運動量式 >

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 |M| M}{h^{\frac{5}{3}}} \quad (2)$$

ここに、 u 、 M は x 方向の流速、流量フラックス、 h は水深、 H は基準面からの水位、 g は重力加速度、 n はマンニングの粗度係数、 q_{in} は横流入流量(住区からリンクに浸入する x 方向の単位長さあたりの流量)、 B はリンク幅、 q_{rain} は単位時間あたりの降雨量である。

ノードおよび住区の水深は次の連続式から計算する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m Q_k + q_{rain} \quad (3)$$

ここに、 A はノードまたは住区の面積、 Q_k はノードまたは住区の周を構成する k 番目の格子辺からの流入流量、

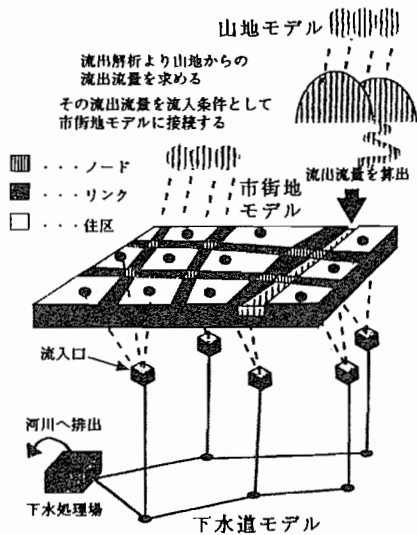


図-1 全体のモデルの概念図

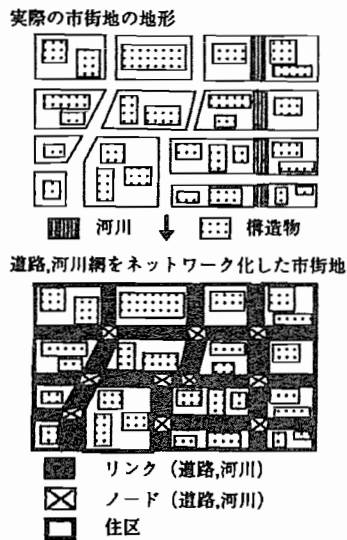


図-2 道路ネットワークのモデル化

m は格子を構成する辺の数である。

リンクと住区、ノードと住区、およびノードとリンクとの流量は、運動量式として(2)式の左辺第2項を省略した式から求める。

(4) 下水道モデル

ここでは終端で河川へポンプ排水される合流式の幹線下水道を取り上げて、下水道のサブモデルを構築する。

下水道網の幹線において、雨水がその幹線に流下するであろう地区(集水区)はある程度決まっている。このことを利用して、下水道の幹線の流入口に対して、図-3のようにそれぞれのサブ集水区を決定する。なお、サブ集水区はいくつかの住区から構成される。次に処理場の最大処理流量($Q_{s,max}$)を各サブ集水区の面積により按分し、それをそのサブ集水区の排水能力($Q_{s_i,max}$)とする。このサブ集水区に存在する氾濫水の一部は、住区を介して下水道流入口により幹線下水道に流下し、終端の処理場より河川に排水される。 i 番目のサブ集水区に存

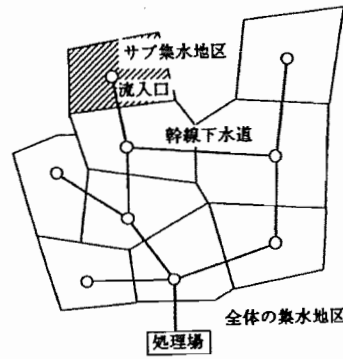


図-3 下水道ネットワークと集水区

在する k 番目の住区(面積 $A_{i,k}$)の最大排水能力 $q_{i,k,max}$ も同様に面積によって按分される。このとき、この住区では以下の連続式を適用して、下水道への排水を考慮する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A_{i,k}} \sum_{l=1}^m Q_l + q_{rain} - \frac{q_{i,k}}{A_{i,k}} \quad (4)$$

$q_{i,k}$ は住区から下水道へ流入する流量であり、このとき、この住区に存在する水量を V 、計算時間ステップを Δt とすると、 $q_{i,k}$ は、

$$q_{i,k,max} \geq V/2\Delta t, \quad q_{i,k} = V/2\Delta t$$

$$q_{i,k,max} < V/2\Delta t, \quad q_{i,k} = q_{i,k,max}$$

である。これらより、サブ集水区 i から下水道へ流入する流量 Q_{s_i} は以下ようになる。

$$Q_{s_i} = \sum_{k=1}^j q_{i,k} \quad (5)$$

ここで j はサブ集水区 i に存在する住区の数である。

各サブ集水区から下水道に流入した氾濫水は、幹線下水道内を一定の伝播速度で流下すると考える。このとき、 i 番目のサブ集水区の流入口から終端の処理場までの距離を L_i 、氾濫水の下水道内での伝播速度を v_i 、氾濫水が下水道に流入してから Δt_i 後に処理場から排水されるとすると $\Delta t_i = L_i/v_i$ が成り立つ。

処理場に到達した氾濫水はポンプにより河川に排水される。時刻 t での処理場から河川への排水流量を $Q_{s,out}(t)$ とすると、 $Q_{s,out}(t)$ は $Q_{s_i}(t)$ を用いて以下のように定義される。

$$Q_{s,out} = \sum_{i=1}^n Q_{s_i}(t - \Delta t_i) \quad (6)$$

3. 京都市内域への適用

(1) 対象領域

対象領域は、図-4に示される京都市域の中央部である。市内域を囲んでいる山地から流下する河川のうち代表的な8流域を山地モデルの対象領域とした。また、氾



図-4 京都市内の計算対象領域

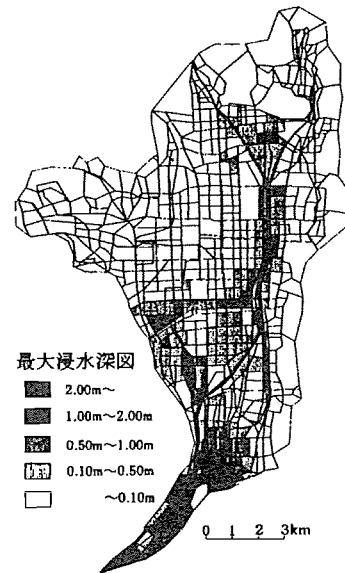


図-6 最大浸水深の分布図 (計算値)

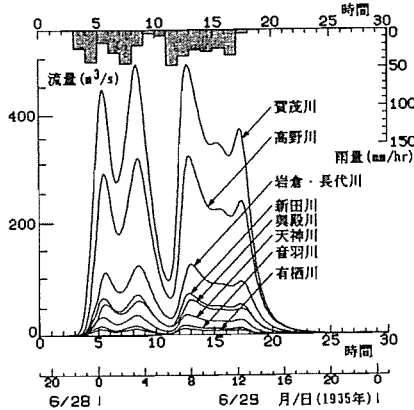


図-5 降雨量と流出流量

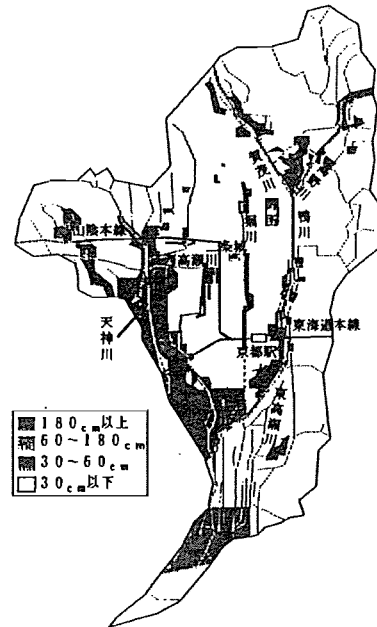


図-7 昭和 10 年の洪水時の氾濫実績

濫解析を行う市街地モデルの対象領域として、京都市内域のうち桂川左岸、宇治川右岸に囲まれた領域を設定した。解析対象領域内には、山地と市街地とに挟まれる丘陵地の領域(ここでは里山と称する)も存在するが、その領域は、市街地モデルの中の地盤が高い住区ととらえ、他のリンク、ノードからの流入はなく、降雨が直接市街地に流入すると考えた。下水道に関しては、末端の処理場で河川にポンプ排水される合流式の幹線下水道をとりあげた。鳥羽、吉祥院、伏見の各処理場が受け持つと見られる、幹線下水道に流入する集水区を決定した。次に、集水区をおおむね均等に分割する形で複数個のサブ集水区を決定し、各々のサブ集水区から幹線下水道への流入口の位置を各サブ集水区の中心付近に配置した。

(2) 計算条件

降雨として図-5 の上部に示す昭和 10 年 (1935 年) 6 月 28 日から 29 日の時間雨量を行い、これを対象領域の全域に一樣に与えた。当時の 6 月 28 日 19 時を計算開始時刻と設定し、初期条件としては、市街地、河川ともドライな状態を仮定した。なお、市街地の降雨について

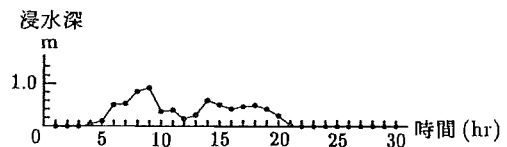


図-8 氾濫浸水深の時間変化

は、地盤への浸透は考えないこととした。山地モデルによる流出解析では、流出率は 0.7 とした。下水道へ流入した氾濫水の流下速度に関しては、下水の設計流速に kinematic 性を考慮して全域一定の流速 $v = 2.0\text{m/s}$ で処理場まで流れるとし、処理場から河川へ排水されることとした。境界条件として、桂川と宇治川の堤防は十分に高いと仮定するとともに、一方、市街地モデルに組み込まれた市内河川から桂川、宇治川へは、河川の水位に

かかわらず常に段落ちの流量公式で求められる流量が排水されるとした。

(3) 解析結果

図-5に、山地モデルによる各流域からの流出流量を示す。最大浸水深の分布の計算結果を図-6に示す。また、昭和10年の洪水時の浸水概況を図-7に示す。両者の浸水範囲を比較すると、市西部の天神川沿いの地域と市中央部の堀川沿いの地域に差違が認められる。この理由は、天神川は昭和10年当時は未改修であり、河床が高く天井川となっているところもあったが、現在は河川改修が進み、河道は掘り込まれており、当時とは状況が大きく変わっているためと考えられる。また堀川は当時開渠であったものが現在では暗渠となっているためである。その他の浸水地域に関しては、多少の違いはあるものの、おおむね昭和10年の洪水時の浸水範囲と一致しており、かつそれらの地域では浸水深に関してもおおむね一致していることが見てとれる。

図-8は市内中心部の四条河原町(図-4参照)における浸水深の時間変化である。ここでは、鴨川右岸からの溢水により計算開始9時間後に最大1m程度の浸水深が現れ、その後も50cm程度の浸水深が約11時間継続する。この地点付近は京都市の商業中心地の一つであり、周辺には地下街や地下鉄、私鉄の地下駅が存在している。このような浸水が生じれば、地表の氾濫水は地下への入口を通して地下空間に浸水し、地表だけでなく地下にも甚大な被害が拡がるのが十分予想されよう。

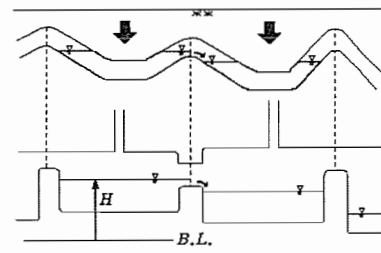
4. 大阪市北区梅田地下街の浸水解析

(1) 解析手法

地上の氾濫解析手法を地下空間に適用することが種々試みられてきたが⁴⁾、ここでは比較的簡便に実際の地下空間に適用でき、流入水の拡がりの概略を把握できる、貯留槽を基にした解析モデルを紹介し、そのモデルを用いて、大阪市北区梅田の地下街およびそれに接続する地下鉄空間の浸水過程を解析してみる。

地下鉄では、図-9のように地下鉄の起伏に応じ、V字型の貯留槽が1次元的に連結しているとする。地下鉄の対象路線および区間図を図-10に示す。各路線の対象区間は地上からの引き込み口がある地点、または淀川の堤防天端高と地盤高が同じ地点までとした。地下街では、地形、地盤高、階層にしたがって小領域に分割し、各小領域を貯留槽とみなして、それらが立体的に連結しているとみなす。図-11に解析の対象とした梅田地下街の対象領域および地盤高を示す。図-12に地下街の貯留槽モデル図を示す。

解析モデルについては、貯留槽内の水位変化は連続式で表現し、管路状態が現れることを考慮してスロットを



H: 貯留槽の水位
 ⇨: 地上や他の地下空間からの流入

図-9 地下鉄空間のモデル化

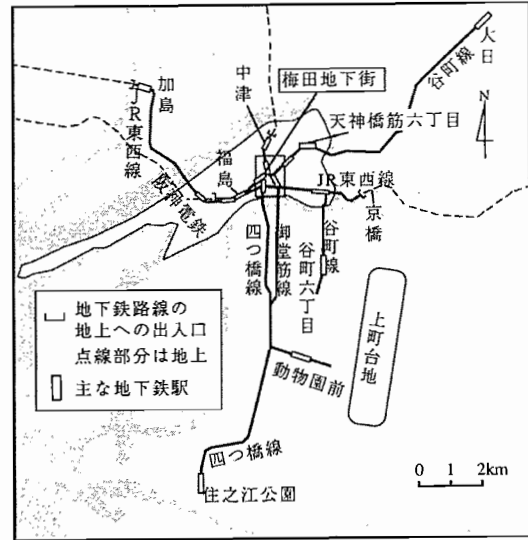


図-10 地下鉄の対象路線および区間図

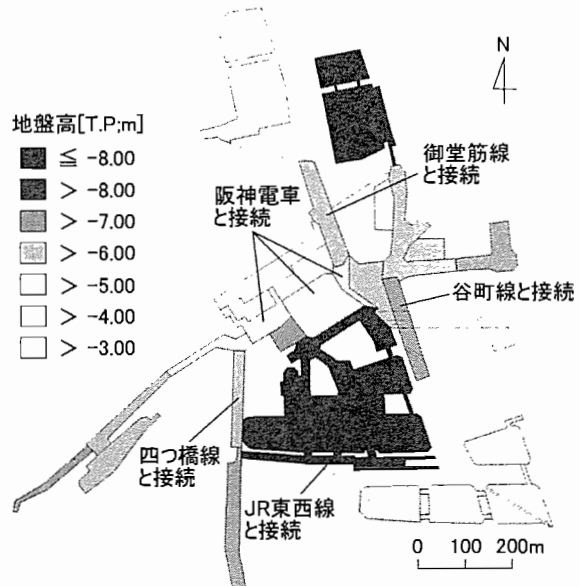


図-11 梅田地下街の対象領域および地盤高図

設ける。

< 連続式 >

$$A \frac{dH}{dt} = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{in} \quad (7)$$

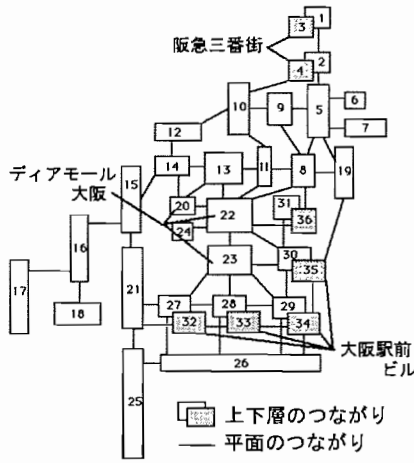


図-12 地下街の貯留槽間の接続関係

ここに、 A ：貯留槽の有効面積、 H ：水位、 t ：時間、 Q_i ：貯留槽が有する i 番目の接面から流入する流量、 m ：流量の出入りが行われる接面数、 Q_{in} ：外部からの（横）流入流量である。 A は貯留槽の水位が天井高を超えるとスロットの面積となる。

貯留槽間の流量の算定については、地下鉄空間には流量式は隣接する貯留槽の水位と貯留槽間の接続部である穴口の上縁、下縁との高さの関係に応じて以下のように分類し、越流公式⁵⁾とオリフィスの流量公式⁶⁾とを併用した解析を行う（図-13 参照）。 h ：穴口の地盤高を基準とした貯留槽の水位、 D ：穴口の高さ（開口高さ）、 B ：穴口の幅（横幅）とすると、

<流量式>（ここでは常に $h_{up} \geq h_{dn}$ とする。）

(I) $D \geq h_{up} \geq 0.0$ の場合

$$Q = \mu B h_{up} \sqrt{2g h_{up}} \quad (h_{dn}/h_{up} \leq 2/3) \quad (8)$$

$$Q = \mu' B h_{dn} \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} \quad (h_{dn}/h_{up} > 2/3) \quad (9)$$

ここに、 g は重力加速度で、 μ 、 μ' は流量係数である。

(II) $h_{up} \geq D$ の場合

(i) $h_{dn} \leq 0.0$ の場合

$$Q = \frac{2}{3} C \sqrt{2g} B \{h_{up}^{\frac{3}{2}} - (h_{up} - D)^{\frac{3}{2}}\} \quad (10)$$

(ii) $D \geq h_{dn} \geq 0.0$ の場合

$$Q = \frac{2}{3} C \sqrt{2g} B \{(h_{up} - h_{dn})^{\frac{3}{2}} - (h_{up} - D)^{\frac{3}{2}}\} + C' B h_{dn} \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} \quad (11)$$

(iii) $h_{dn} \geq D$ の場合

$$Q = C' B D \sqrt{2g(h_{up} - h_{dn})} \quad (12)$$

ここに、 C 及び C' は流量係数である。

地下街には連続式と以下に示す運動量式を適用する。

<運動量式>

$$\frac{L}{g A_b} \frac{dQ}{dt} = \Delta H - \alpha L Q |Q| \quad (13)$$

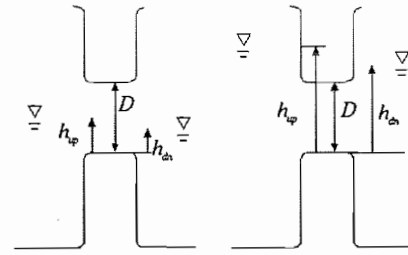


図-13 貯留槽間の流況の模式図

ここで、 ΔH ：隣接する貯留槽間の水位差、 Q ：流量、 g ：重力加速度、 L ：隣接した貯留槽の図心間の距離、 A_b ：接面の断面積、 α ：損失係数である。

底面積に対するスロットの面積の割合は地下鉄空間全体の底面積に対して階段など地上に通じる部分が占める割合に通気孔の断面積の割合を併せて 0.02 とした。地下街についても同様の値とした。地下 1、2 階のように多層化したところでは流量公式などを適用して上下層間の流量を算定する。また、地下街と地下鉄の間の流量の算定にも流量公式などを適用する。なお、地下街と地下鉄は地下鉄の改札口を通して鉛直に接続している。

(2) 解析結果

解析結果の一例として一定流量 $60\text{m}^3/\text{s}$ を地下街の北側から流入させた場合（ケース 1）と南側から流入させた場合（ケース 2）について、図-14 に梅田地下街の、図-15 に地下鉄の浸水状況を示す。ケース 1 の地下街では浸水開始 1 時間後に大阪駅前ビルや JR 東西線北新地駅改札口まで浸水域が拡大し、浸水深、浸水域ともに 4 時間後までほぼ一定のままである。地下鉄に関しては谷町線への流出が集中し、図-15 からわかるように、4 時間後には東梅田駅から約 10km 離れた守口駅北部まで浸水域が拡大している。これは氾濫水の流入箇所から遠く離れた場所でも浸水被害が生じる可能性があることを示している。

次にケース 2 についての浸水状況を述べる。ケース 1 では浸水域が広く拡大していたのに対し、ケース 2 では 4 時間後でもディアモール大阪までしか浸水が広がらない。これは氾濫水の流入点に近いディアモール大阪や大阪駅前ビルが梅田地下街の中でも最も地盤が低く、そのため浸水域がそこから広がらなかったものと思われる。また、地下鉄においては、ケース 1 では谷町線に集中していた流出が、ケース 2 では JR 東西線に集中している。そして図-15 にも示しているとおり、JR 東西線は浸水開始 4 時間後ではほぼ水没していることがわかる。このことより、氾濫水の流入地点によって地下鉄の浸水状況が大きく異なることがわかる。

以上の解析より、対象とした地下街空間特有の構造とともに地下鉄の構造（地下街との連結位置とその貯留容量）が地下空間の浸水過程に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

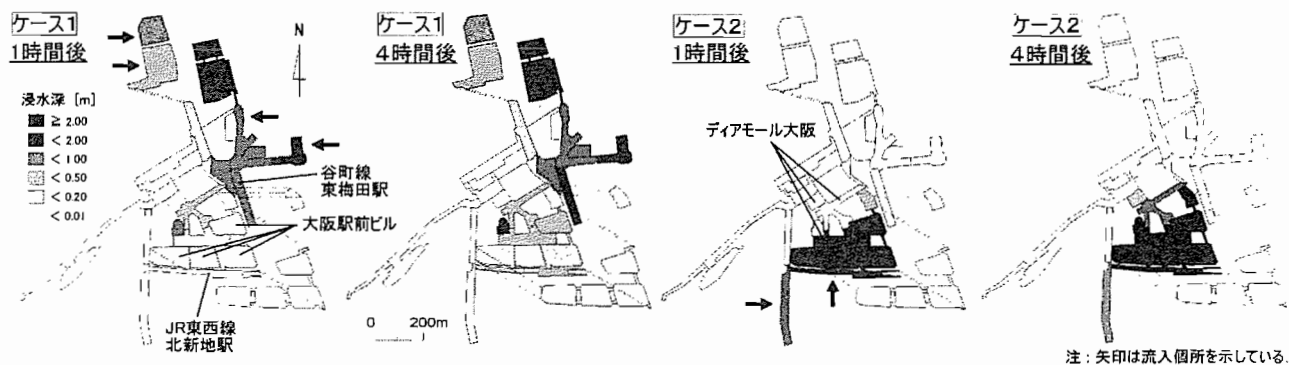


図-14 梅田地下街の浸水状況

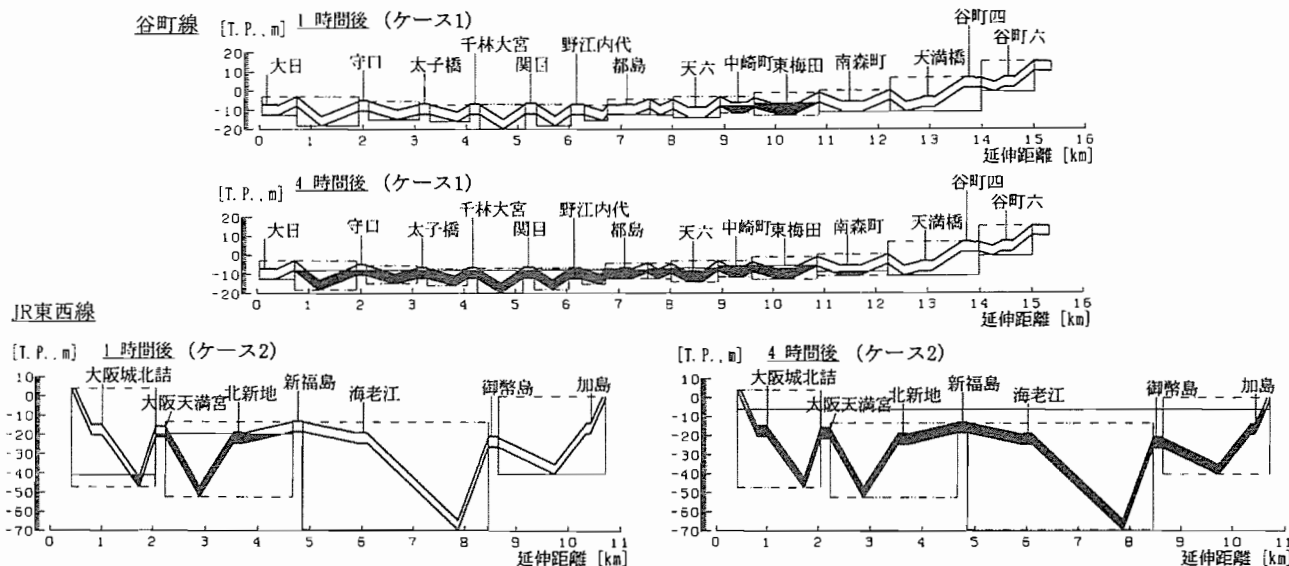


図-15 地下鉄の浸水状況

5. 結言

都市水害は、「都市」という場の複雑さのために、その解析も一筋縄でいかないことが多いが、対象とする都市域の場および襲ってくる外力の特徴をよく見極め、できるだけ丁寧な解析を進めていくことが大切であろう。また今後は、都市を含む流域の視点で水を捉えることが、水害の研究においても一層重要になると思われる。

参考文献

1) 椎葉充晴, 立川康人, 市川温, 堀智晴, 田中賢治: 圃場容量・パイプ流を考慮した斜面流出計算モデルの開発, 京都大学防災研究所年報第 41 号 B-2, pp.229-235, 1998.

2) 椎葉充晴, 市川温, 榑原哲由, 立川康人: 河川流域地形の新しい数値表現形式: 土木学会論文集 No.621/II-47, pp.1-9, 1999.
 3) 井上和也, 戸田圭一, 林秀樹, 川池健司, 坂井広正: 市街地における氾濫解析モデルの考察, 京都大学防災研究所年報第 41 号 B-2, pp.299-311, 1998.
 4) 戸田圭一, 井上和也, 前田修, 谷野知伸: 大都市の地下空間の氾濫浸水解析, 水工学論文集, 土木学会水理委員会, 第 43 巻, pp.539-544, 1999.
 5) 土木学会編: 水理公式集, 昭和 46 年改訂版, p.265, 1971.
 6) 椿東一郎, 荒木正夫: 水理学演習上巻, 森北出版, pp.204-207, 1961.

(2002.12.9 受付)