

豪雨による都市水害の水理モデルの開発

戸田圭一・井上和也・村瀬賢*・市川温
*大阪ガス(株)

要 旨

豪雨による都市部の氾濫プロセスが解析できる数学モデルを開発した。モデルは、道路を開水路網と見立てる1次元ネットワークの計算法を基にしたものであり、中小河川も地盤が低い道路とみなしてこれを開水路網に組み込んでいる。都市域近郊の山地領域からの流出解析により算出された流出流量をネットワークモデルの境界条件とし、都市域内の降雨量も横流入とみなして考慮している。また、下水道モデルについては、市街地の中の幹線下水道を考慮している。本モデルを京都市中心部に適用したところ、本モデルは豪雨時の氾濫プロセスを詳細に表現することが可能であることが確認された。また得られた計算結果は、過去の氾濫実績と概ね一致するものであった。

キーワード：氾濫解析，流出解析，豪雨，下水道，都市域

1. 序論

わが国の都市域は河川河口部の沖積地である沿岸域に位置することが多いこと、ならびに梅雨時期、台風時期に雨量が集中するという地理的・気象的条件の下、豪雨による内水災害や、内水および外水災害の重畳災害を被る危険性が極めて高い。特に近年においては、わが国のいたるところで異常な豪雨が目立ち、また都市部およびその近郊での都市化の進展に伴う流出形態の変化による流出流量の増大がみられ、内水災害の危険度が増大している。

都市の水災害に関する研究に目をむけると、従来より、水文学の分野からは都市域を対象とした流出解析法の研究が、水理学の分野からは外水を対象とした氾濫解析法の研究がそれぞれ進められてきており、現象の解明や水害の予測、ひいては治水対策の検討に少なからず貢献してきている。しかしながら、都市域において、都市域およびその周辺に発生する豪雨により生じる内水氾濫のプロセス、すなわち都市域を流下する河川流量の増大、下水道流量の増大の時間的変化、ひいては河川、下水道の処理能力以上の流出量による地表での氾濫の発生と氾濫流

の挙動、そして主に下水道による氾濫水の排水過程といった「都市域の豪雨氾濫現象」を、時間的、空間的に総合的かつ詳細に説明できる数学モデルは、著者らが知る限り、未だ実用に供する形で提供されてはいないようである。

このような状況に鑑みて本研究は、都市域およびその近郊の流出解析法と中小河川網、下水道網を組み込んだ都市域の氾濫解析法を結合し、上記の都市域の豪雨氾濫現象を総合的、詳細に表現することを可能にする「都市域の豪雨氾濫解析モデル」の開発を試みたものである。そして、ここで構築したモデルを京都市の中心部に適用し、昭和10年の京都の洪水氾濫実績との比較をとおしてモデルの妥当性、実用性を議論するとともに、現在の京都市内の内水災害に対する危険度について若干の考察を行ったものである。

2. 数値解析モデル

2.1 モデルの概要

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

- (1) 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),
- (2) 市街地を対象とした, 中小河川網を組み込んだ氾濫解析モデル(市街地モデル),
- (3) 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).

(1)については, 椎葉ら(1998)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, 流出解析を行う際にの流域地形の数値表現法に関しては, 市川ら(1998)が提案している, 流水線モデルを改良した方法を用いる。この方法の特徴の一つは, 流域斜面において流水線を決定するにあたって, Fig.1に示すように, 各格子点において, その周りに位置する格子点のうち, 最急勾配で下る方向および最急勾配で上る方向に位置する点とを結ぶ線を流水線としていることである。もう一つの特徴は, 流域斜面を表現する流水線に面積を持たせて「斜面素片」と定義する面的要素を導入し, 多数の斜面素片を分流・合流を繰り返して結合していくことにより, 斜面地形の収束・発散の表現を可能にしたことである。上述したモデルにより, 対象領域の降雨条件を入力すれば, 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与えることができる。

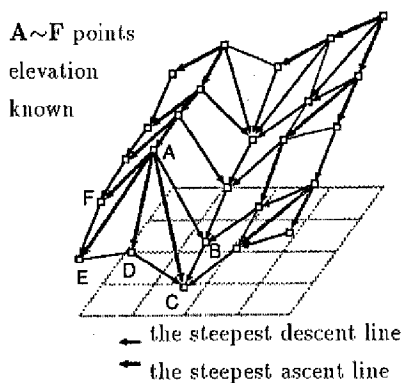


Fig.1 Treatment of stream line

(2)に関しては, 井上ら(1998)が提案した, 氾濫水の流れは主として道路沿いに流れるとし, 道路を開水路網と見立てる1次元のネットワーク解析手法に, 中小河川も地盤が低い道路とみなしてそれらを道路ネットワークの中に新たに組み込む。これにより, 中小河川の溢水による道路への氾濫, ひいては道路沿いの住区への氾濫の表現が可能となる。また市街地への降雨も, 道路(中小河川も含む), 住区への横流入としてモデルの中で考慮している。

(3)に関しては, 終端にポンプ場を有する幹線下水道をとり上げた。そして, その幹線が受け持つ集水地区を決定し, 各集水地区の最大排水流量を終端

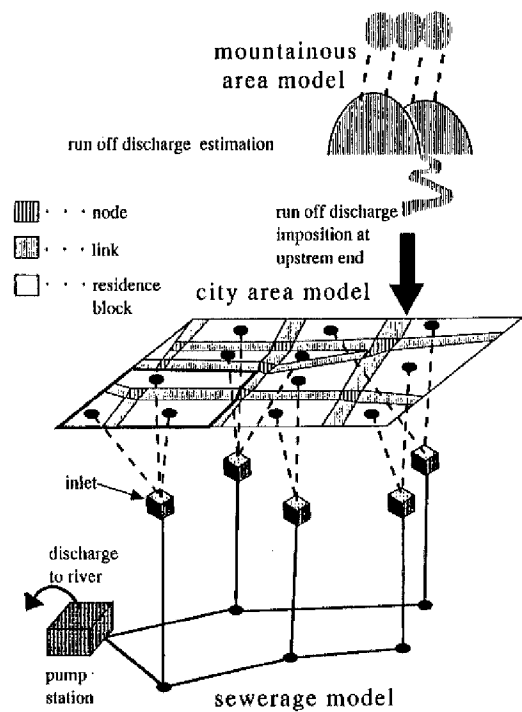


Fig.2 Framework of total model

の下水処理場の排水能力から割り当て, その最大排水流量以下の雨水ないしは氾濫流量が幹線下水道を経て終端の下水処理場からポンプによって河川に排水されるとしている。なお, 今回対象とした京都市内域では, 雨水を近隣の市内河川に排水する中小の合流式および分流式の下水道が数多く存在する。市街地モデルによる地表の氾濫水の市内河川への流出は, これら市内の中小の下水道による排水をある程度含んでいると解釈することができよう。

以上概説した全体のモデルの概念図をFig.2に示す。なお, 市街地モデル, 下水道モデルについては次節で詳述することとする。

2.2 河川網を考慮した市街地の氾濫解析

(1) 街路ネットワークモデル

本モデルでは, 対象領域をFig.3に示すように道路とそれ以外(住区とよぶ)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。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。 x 軸を始点ノードから終点ノードの向きにとり, リンクを1次元の長方形断面水路とみなす。

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

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

ここに、 u, M は x 方向の流速、流量フラックス、 h は水深、 H は基準高さからの水位、 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つぎ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、 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間の流量は、運動量式として(2)式の左辺第2項を省略した次の式から求める。

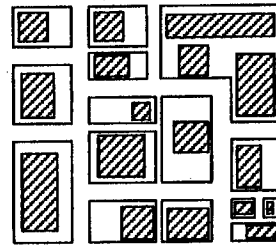
$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 |M| M}{h^{5/3}} \quad (4)$$

ここで格子間距離 $\Delta x = L_1 + L_2$ (L_1, L_2 : 隣接するそれぞれの格子の受け持つ代表長)については、以下の各々の場合についてつぎのように定義する。まず、リンクとノードの場合にはFig.4(a)に示すようにノードの図心とリンク端の格子の図心間距離を適用する。リンクと住区の場合には、Fig.4(b)に示すようにリンクと住区との境界線における垂直二等分線をひき、その直線が住区に切り取られる長さ L_h を用いて、 $L_1 = B/2, L_2 = L_h/2$ と表す。同様にノードと住区の場合には、Fig.4(c)に示すようにノードと住区の境界の垂直二等分線をひき、その直線がノードに切り取られる長さ L_n と住区に切り取られる長さ L'_h を用いて、 $L_1 = L_n/2, L_2 = L'_h/2$ と表す。また、街路網をネットワーク化する際に、長い直線道路を複数のリンクに分割せざるを得ない場合が生じる。このとき、ノードを介して連続する2本のリンクのなす角度が 10° 以内であれば、それらのリンクは直線とみなし、この場合はリンクとノード間のフラックスを求める際には式(2)を用いることとする。

上述の式を用いて氾濫解析を進めるが、地盤高と水深の関係によっては越流公式あるいは段落ち式を用いる。Fig.5(a)のように、隣り合う地盤高のうち地盤高が低い方の水位が他方の地盤高よりも高い場合には、次に示す越流公式を用いて流量フラックス M_0 を求める。

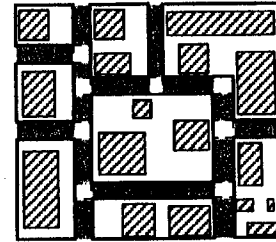
$$M_0 = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (5)$$

real shape of city area



structures

city area considering street network

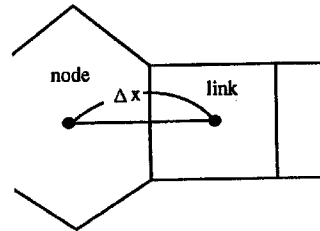


link

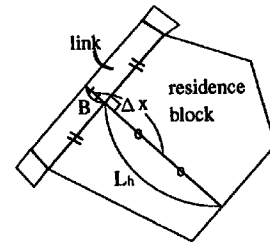
node

residence block

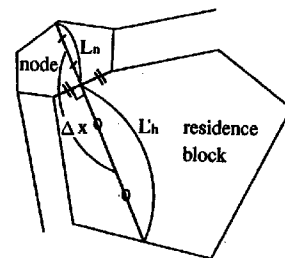
Fig.3 Modeling of street network



(a) Δx between link and node



(b) Δx between link and residence block



(c) Δx between node and residence block

Fig.4 Treatment of Δx

ここに h_1 は高い方の地盤高から測った水深、 μ は定数でここでは $\mu = 0.35$ を用いる。また Fig.5(b) のような場合、つまり地盤高の低い方の水位が一方の地盤高よりも低い場合には、地盤高の高い方の水深 h_n を用いて次に示す段落ち式より M_0 を求める。

$$M_0 = \mu h_n \sqrt{gh_n} \quad (6)$$

μ は段落ち部のエネルギー水頭に依存する値であるが、ここでは井上 (1986) にしたがって一定値 $\mu = (2/3)^{3/2}$ を用いている。また氾濫水の先端条件については、岩佐ら (1980) にしたがってフロントの移動限界水深 h_c (ここでは $h_c = 0.001\text{m}$) を用いて取り扱う。

(2) 中小河川網のモデル化

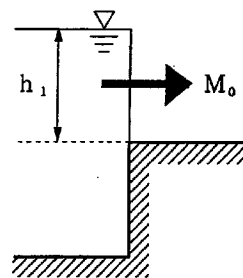
都市を流下する中小河川の多くは掘り込み河道であり、それぞれの河川は道路と同じように分合流をしており、ネットワークを形成しているとみなすことが可能である。よって中小河川も、それらを地盤の低い道路と考え、街路ネットワークモデルの中に組み込むことが可能である。中小河川を表すリンク、ノードを、道路を表すリンク、ノードと区別してそれぞれ、河川リンク、河川ノードと呼ぶこととする。またこの小節に限り、記述をより明確にするために、道路を表すリンク、ノードをそれぞれ、道路リンク、道路ノードと表現する。

河川リンク、河川ノードは、実際の河川の掘り込み深さにあわせて地盤高を下げて計算を行う。河川内の計算は基本的に道路の計算のときと同様に行うが、Fig.6(a) の場合のように河川リンク、河川ノードの水深が河川の掘り込み深さより低いときは、河川に隣接する道路リンク、道路ノード、住区から河川リンク、河川ノードに流入する流量フラックス M_0 を式 (6) により求める。一方、Fig.6(b) の場合のように河川水深が大きくなり氾濫が生じた場合は、式 (2) を用いて流量フラックスを求める。

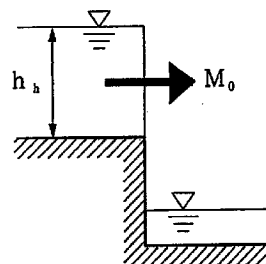
流量フラックスを求める際に行う補間の方法は、河川リンクと道路ノード、住区間、および河川ノードと道路リンク、住区間では、街路ネットワークモデルの道路の場合と同じである。隣接する河川リンクと道路リンク間の流量フラックスを求める際には、河川リンク、道路リンクそれぞれの幅 B_i, B_j を用いて $L_1 = B_i/2, L_2 = B_j/2$ とする。また、河川ノードが道路ノードと隣接する場合には、両者ともほぼ長方形と近似できるため、河川ノード、道路ノードの図心と境界線の midpoint までの距離を L_1, L_2 とする。

(3) 下水道網のモデル化

都市の下水道は、降雨が集中したときには河川、水路、溝渠などと同様に雨水を排除し浸水を防御する機能を有しており、本研究のように、豪雨による都市域での氾濫を扱う場合、内水排除施設としての

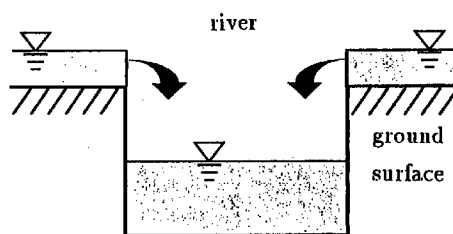


(a) overflow case

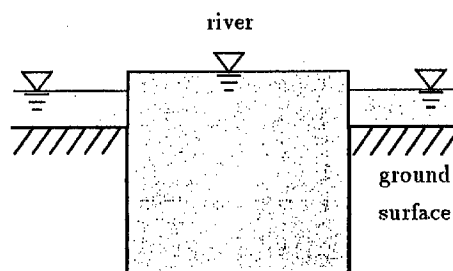


(b) drop case

Fig.5 Treatment of overflow and drop



(a) drop case



(b) inundation case

Fig.6 Treatment of mass flux through river

下水道の働きは重要な位置を占める。

実際の都市域では、合流式あるいは分流式の下水道が張り巡らされ、雨水を近隣の市内河川に自然流下させるものもあれば、幹線下水道として終末の処理場まで流下させ、そこからポンプで河川に排出するものもある。前者の幹線下水道につながらない枝線の下水道の役割は、市街地モデルによる地表の氾

溢水の市内河川への流出である程度表現できるものと仮定し、ここでは終端で河川に排水される合流式の幹線下水道を取り上げて、それをモデル化し、全体モデルの中のサブモデルとして組み込むこととした。

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(集水地区)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Fig.7のようにそれぞれの集水地区を決定する。なお、集水地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を各集水地区の面積により按分し、それをその集水地区の排水能力とする。すなわち、処理場の最大処理流量を $Q_{s,max}$ 、処理場の受け持っている集水地区の面積の合計を S_{total} 、今求める i 番目の集水地区の面積を S_i とすると、この集水地区の最大排水能力 $Q_{s_i,max}$ は、

$$Q_{s_i,max} = Q_{s,max} \times \frac{S_i}{S_{total}} \quad (7)$$

で求められる。ただし、

$$S_{total} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (8)$$

である。 n は処理場が受け持っている集水地区の数である。この集水地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 番目の集水地区に存在する k 番目の住区の最大排水能力 $q_{i,k,max}$ は、住区的面積を $A_{i,k}$ とすると、

$$q_{i,k,max} = Q_{s_i,max} \times \frac{A_{i,k}}{S_i} \quad (9)$$

で表される。このとき、この住区では以下の連続式により計算を行う。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A_{i,k}} \sum_{l=1}^m Q_l + q_{rain} - \frac{q_{i,k}}{A_{i,k}} \quad (10)$$

$q_{i,k}$ 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、

$$\begin{aligned} q_{i,k,max} &\geq V/2\Delta t, & q_{i,k} &= V/2\Delta t, \\ q_{i,k,max} &< V/2\Delta t, & q_{i,k} &= q_{i,k,max} \end{aligned}$$

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

$$Q_{s_i} = \sum_{k=1}^j q_{i,k} \quad (11)$$

ここで j は集水地区 i に存在する住区の数である。

各集水地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 番目の集水地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 秒後に処

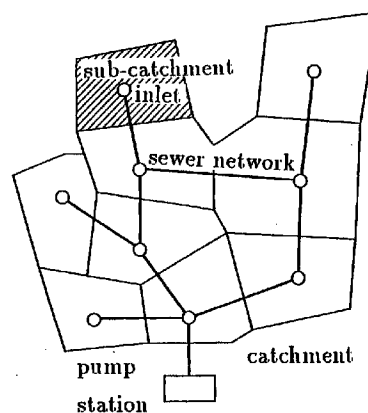


Fig.7 Sewer network and catchment area

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 (v_i については後述)。

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が、ポンプ排水を考慮する河川ノードでは以下の連続式により計算を行う。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m Q_k + q_{rain} + \frac{Q_{sout}(t)}{A} \quad (12)$$

ここに A はノードの面積、 $Q_{sout}(t)$ は時刻 t での処理場から河川への排水量であり、 $Q_{s_i}(t)$ を用いて以下のように定義される。

$$Q_{sout} = \sum_i^n Q_{s_i}(t - \Delta t_i) \quad (13)$$

ただし、 $Q_{sout} \leq Q_{s,max}$ である。

3. 京都市への適用

3.1 解析に関わる基本事項の整理

(1) 対象領域

過去と比較すると、京都市も都市化が進んでおり、都市河川のほとんどがコンクリートの三面張りであり、速やかに洪水が排出されるようになっている。また地表面の浸透能力も減少し、都市河川への流出流量が増大し、豪雨による都市型水害の危険性が高まっている。また都市化に伴う人口・資産の集中のみならず、京都市は日本を代表する古都であり、その歴史の深さやそこで育まれた文化には味わい深いものがある。また市内には多くの有名な社寺、仏閣に加え、御所や二条城など世界的な文化遺産が存在する。よって、ひとたび甚大な洪水氾濫が発生すれば、文化財を含めた被害は計り知れないものとなる。

対象領域である京都市域をFig.8に示す。図より明らかなように、京都市は北と東西が山地で囲まれた盆地となっており、市街地の中心部を鴨川が流れ、市の西部、南部をそれぞれ桂川、宇治川が流れている。ここでは、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ものの流域を山地モデルの対

象領域とした。また、氾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。これらの領域は、桂川右岸、宇治川左岸、および東山より東部の山科区を除いた京都市の中心域と考えられる領域をほぼ網羅している。対象領域の地盤高を Fig.9 に示す。この図より、京都市は南北方向の勾配がかなり大きくなっており、南に行くにしたがって地盤が低くなるが見てとれる。また東西方向に関しては東の方が西に比べると地盤が高くなっている。

(2) 山地モデル・市街地モデル

山地モデルの対象領域として、京都市を取り囲む河川流域の中から8ヶ所の流域を取り出した (Fig.8 参照)。流域面積は Table 1 のとおりである。他にも流域を考えるべき河川が存在するが、その流域面積も河川自体も小さく、その影響も小さいと考えられるのでここでは取り扱わないこととした。なお、解析対象領域内には、山地、市街地に隣接する里山の領域 (hilly area) 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、市街地への直接降雨流出のみを考えることとする。市街地モデルの対象領域の面積を Table 2 に示す。

Fig.9 に、市街地モデルの対象領域を街路ネットワークモデルに従って住区と道路、河川に分類した様子もあわせて示す。河川も含めて、リンク数は1871、ノード数は1173、住区数は783である。道路に関しては、高架でない鉄道の軌道も道路に含めており、地盤高を周囲の地盤に対して3m高く設定している。道路や鉄道の高架の部分は、氾濫水が高架部分の下を拡がっていくと考え無視している。また、盛土部分を貫通する道路に関しては、その道路の地盤高を与えている。なお、河川に架かる橋梁は、今回解析の対象とはしていない。

(3) 中小河川網・下水道網

京都市内を流れる河川の主なものとしては、中心部を流れる鴨川、西部を流れる天神川、および両河川の間を流れる西高瀬川である。中小河川は細かなものまで含めると数多く存在し、また複雑に分合流している。特に市内南部には多くの用水路が張り巡らされており、複雑な様相を呈している。市内中心部に位置する堀川は、市内中心部から河川が始まり、暗渠部を経て南へ流れ鴨川に流入する。また北部を流れる疏水の一部も暗渠となり、賀茂川へ流入している。これら暗渠部は、ここでは蓋の存在を考慮せず横流入のない開水路としてとらえ、河川リンクとして表現している。河川の掘り込み深さは、簡単のため、河川の規模により4種類 (7.0m, 5.0m, 3.5m, 2.5m) に分けて、それぞれ一定値を与えている。

Table 1 Area of river basin

river basin	area(km ²)
Shinden	9.6
Otowa	2.2
Takano	42.0
Iwakura · Choudai	17.0
Kamo	63.9
Tenjin	4.7
Okutono	8.4
Arisu	1.4

Table 2 Area of studied city region

total	net city area	hilly area	river
129.0km ²	92.3km ²	31.7km ²	5.0km ²

下水道に関しては、終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取り上げている。先ず、京都市下水道局の資料 (京都市下水道局, 1997) を用い、鳥羽、吉祥院、伏見の各処理場が受け持つとみられる、幹線下水道に流入する全集水地区を決定した。次に、全集水地区を概ね均等に配分する形で複数個の集水地区を決定し、各々の集水地区の水が幹線下水道に流入する流入口の位置を各集水地区の中心付近に配置した。下水道の幹線および流入口の位置を Fig.10 に示す。また、鳥羽、吉祥院、伏見の各処理場の排水能力は、それぞれ134m³/s、40m³/s、16m³/sである。

対象領域のうち、市内の南部領域、特に鴨川以南の地盤高はかなり低くなっており、そこに位置する中小河川には、宇治川や桂川への排水のための排水ポンプが設置されている。ここでは7ヶ所の河川排水ポンプ (総排水能力約60m³/s) を取り上げ、その排水効果をポンプの位置する住区の連続式の中で考慮している。

3.2 計算条件

降雨条件として Fig.11 の各図の上部に示す昭和10年 (1935年) 6月28日から29日の時間雨量を用いた (京都市役所, 1936, Fig.11 のすべてに共通)。当時の6月28日19時を計算開始時刻と設定し、計算時間は、豪雨がおさまった後の氾濫水の挙動を追跡することも考慮して30時間とした。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。降雨は、市街地、山地ともに同時に起こると仮定し、市街地の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、降雨量をそのまま有効降雨として与え、流域全体の流出率を勘案し

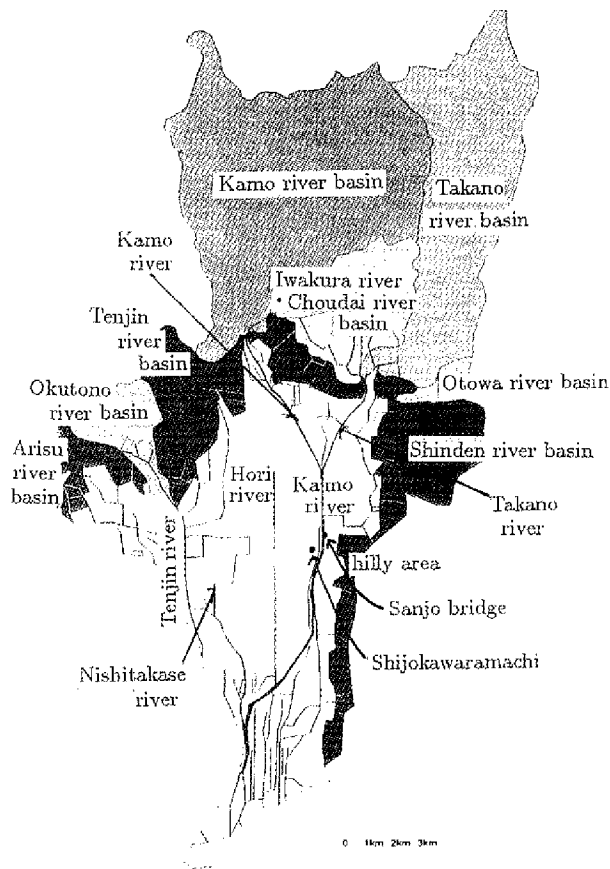


Fig.8 Studied area (Kyoto city)

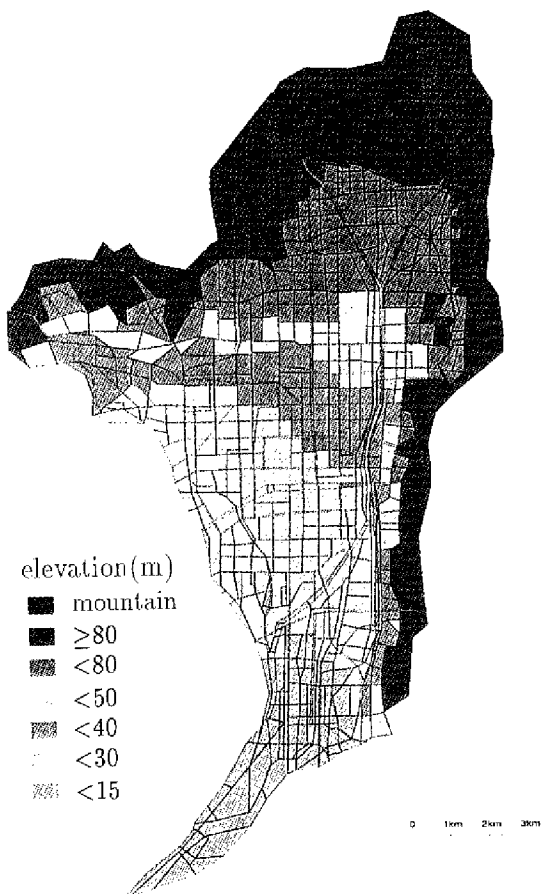


Fig.9 Ground elevation and network

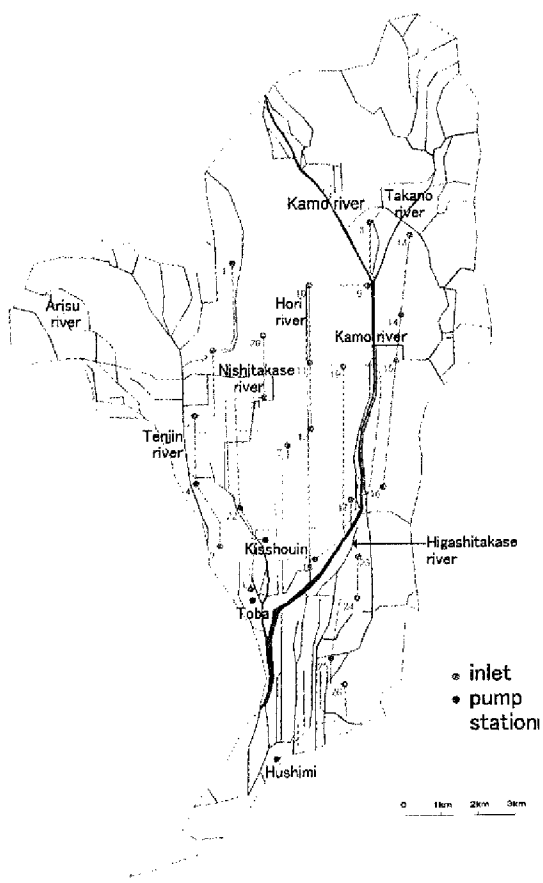


Fig.10 Sewer network and inlet nodes

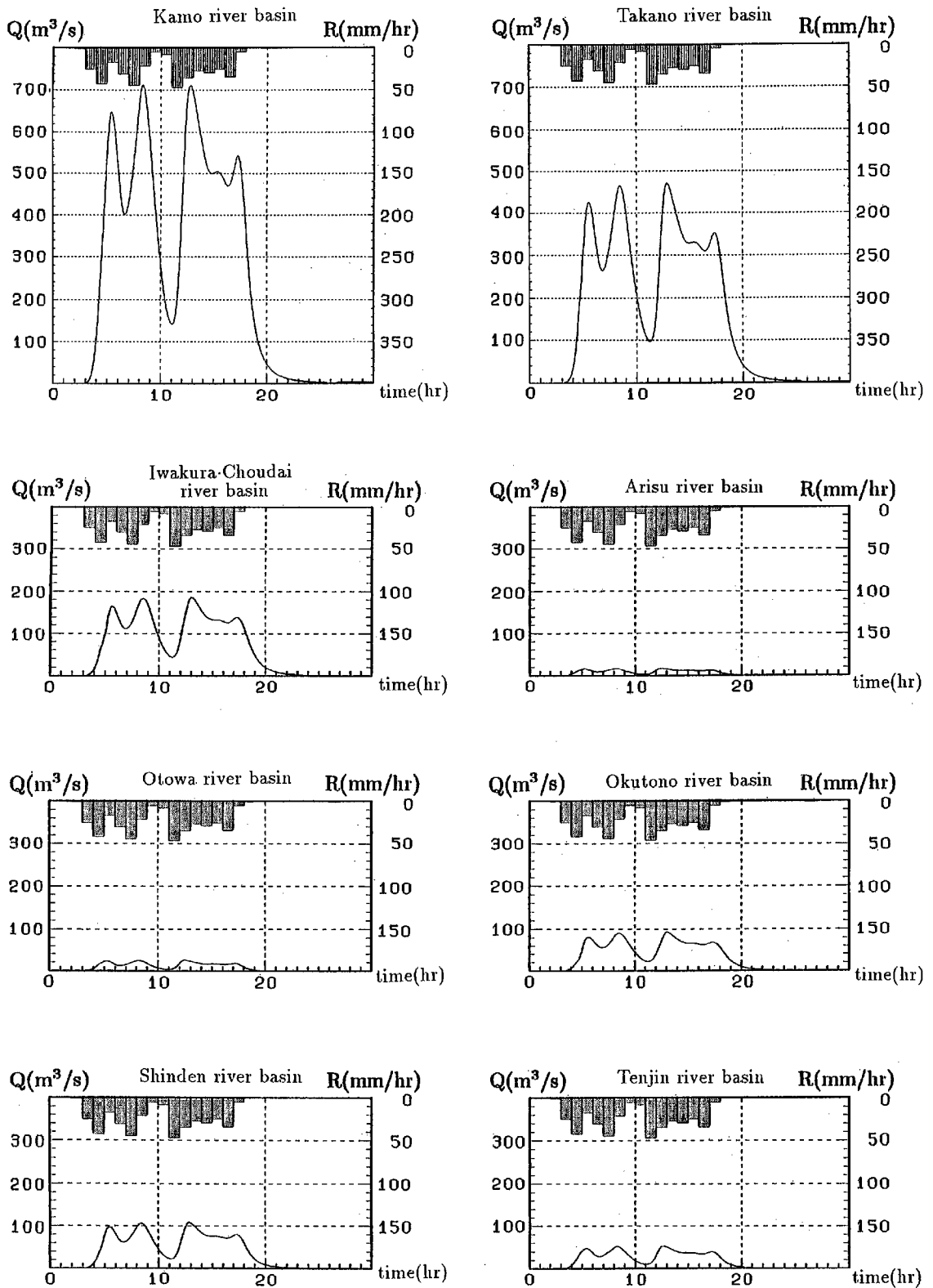


Fig.11 Rainfall and runoff discharge

て、得られた流出流量の70%が河川への流出流量であるとされた。市街地モデルによる氾濫解析においては、マンニングの粗度係数を、住区で $n=0.067$ 、リンク、ノードで $n=0.043$ 、河川で $n=0.02$ としている。下水道に流下した氾濫水の流下速度に関しては、下水の設計流速 v がおおよそ $v=1.5\sim 2.0\text{m/s}$ であることより、この値に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し、対象領域は壁に囲まれていると考えた。一方、市街地モデルに組み込まれた中小河川から桂川、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。

3.3 解析結果と考察

Fig.11に、降雨量とあわせて山地モデルによる各流域からの流出流量を示す。昭和10年6月の豪雨では降雨量に2つのピークが存在し、流出流量にもその傾向が現れている。また、流出流量のピークは降雨量のピークより1~2時間遅れている。

次に最大浸水深の分布の計算結果をFig.12に示す。また、昭和10年の洪水時の浸水概況(京都府役所、1936)をFig.13に示す。両者の浸水範囲を比較すると、天神川沿いの地域と堀川沿いの地域に差違が認められる。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。現在は河川改修が進み、河道は堀り込まれているため当時とは状況が変わっていると考えられる。また堀川は現在では暗渠となっている。以上のことを考慮すれば、天神川、堀川では、昭和10年と現在の状況を比較すると水害発生の危険度が大幅に緩和されていると言えよう。また、その他の浸水地域に関しては、多少の違いはあるものの、概ね昭和10年の洪水時のそれと一致しており、かつそれらの地域では浸水深に関しても概ね一致していることが見てとれる。

次に氾濫水の挙動の時間変化を詳細に見ていくこととする。Fig.14は計算開始8時間後、11時間後、17時間後、24時間後の浸水深の分布図である。今回対象とした降雨条件では降雨に2回のピークがあり、Fig.14の計算開始8時間後は降雨の1回目のピーク時、11時間後は降雨がいったん弱まった時、17時間後は2回目のピーク終了時、そして24時間後は降雨がおさまってから7時間後である。図中の「・」は河川リンクから隣接するリンク、ノード、住区に向かって流量が発生した場所であり、溢水地点と考えられる。図より市内中心部の鴨川、天神川の下流域、

および領域最南端の低地の中小河川で溢水が見られる。Fig.15は市内中心部の四条河原町における浸水深および鴨川の三条大橋地点の水深の時間変化である。鴨川からの溢水により四条河原町では最大1m程度の浸水深が現れている。この付近は京都府の商業中心地であり、周辺には地下街や地下鉄、私鉄の地下駅が存在しており、このような溢水が生じれば地表だけでなく地下にも甚大な被害が予想される。

Fig.16は総氾濫水量(河川を流れる水量も含めた市街地モデル内に存在する総水量)および市街地の氾濫水量の時間変化を表したものである。図には市街地への降雨流入量、降雨、氾濫水の下水道内への流入量も合わせて示している。またFig.17は浸水深別の氾濫面積の時間変化を示している。市街地氾濫水量は河川の溢水地点の発生に伴い増加するが、今回の降雨条件では降雨の1回目のピーク時の出水がおさまる前に排水が完了する前に2回目の降雨のピークが発生しており、氾濫が拡大している。そして計算開始17時間後にピークを迎え、その後7~8時間で減少している。幹線下水道への流入量は計算開始後5~17時間の間は最大排水量に匹敵する量であるにもかかわらず、その処理量は市街地氾濫水量に比べてわずかであり、今回のように河川からの溢水が起ころ際には、幹線下水道に多大な排水効果を期待することはできない。氾濫水は、地盤が低い南の領域に流下しながら、河川に自然排水されると考えられるが、領域最南端の地区は低平地であり、そこでの氾濫水の排除はその多くを河川からの自然排水と河川ポンプに頼るため、結果的に長時間にわたって氾濫水が滞留するようである。

なお、今回の計算では市内中小河川からの排水に及ぼす桂川、宇治川の水位の影響を考慮しなかったが、これら河川の外水位が高く氾濫水の中小河川への排水が進まない場合には、さらに厳しい氾濫状況が予想されよう。

4. 結論

道路を開水路網とみたる従来の1次元の街路ネットワークモデルに、河川網を地盤が低い道路とみなし、それらを組み込む新たな氾濫解析法をベースに、これに山地からの流出解析モデル、幹線下水道モデルを組み込んだ、「都市域の豪雨氾濫解析モデル」を開発した。そしてこのモデルを京都市内域に適用し、内水氾濫の挙動をシミュレーション解析した。本研究をとおして得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 豪雨時に時間の経過とともに市内河川の溢水により市内が氾濫し、その氾濫水が排水されるプロ

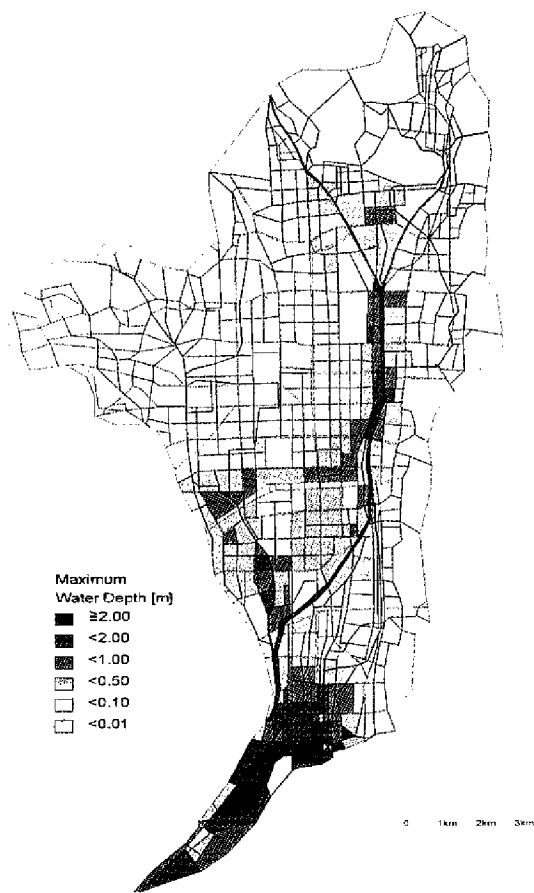


Fig.12 Maximum inundation depth distribution
(computed)

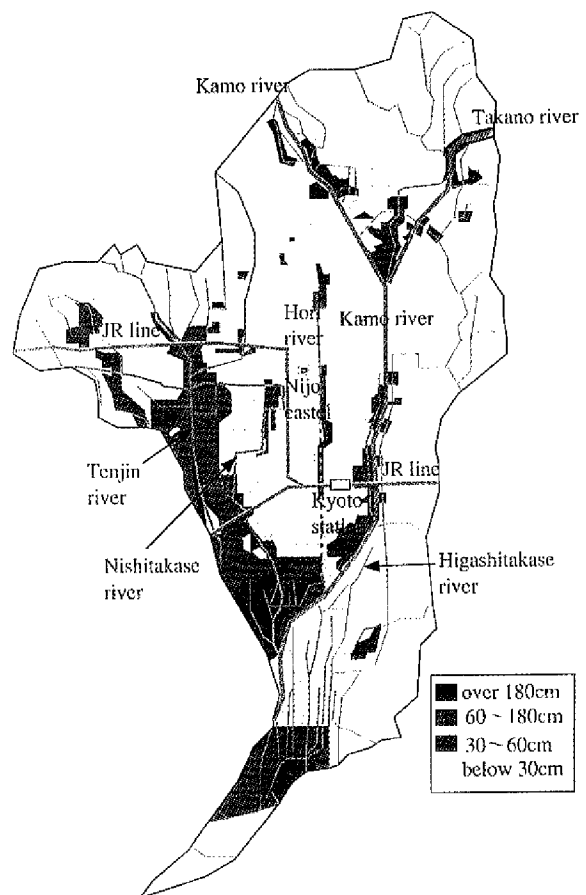


Fig.13 Maximum inundation depth distribution
(record in 1935)

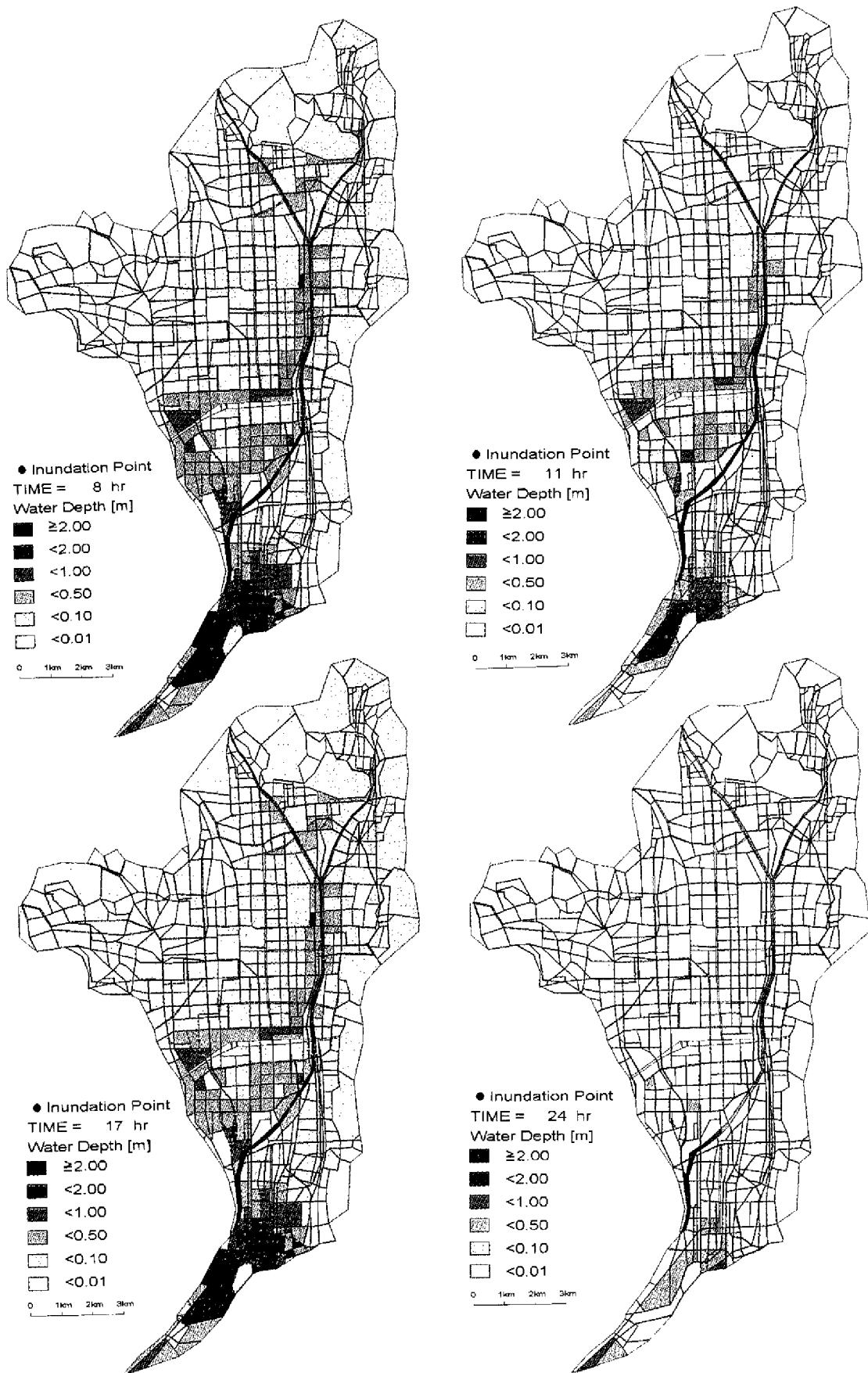


Fig.14 Temporal change of Inundation flow depth distribution

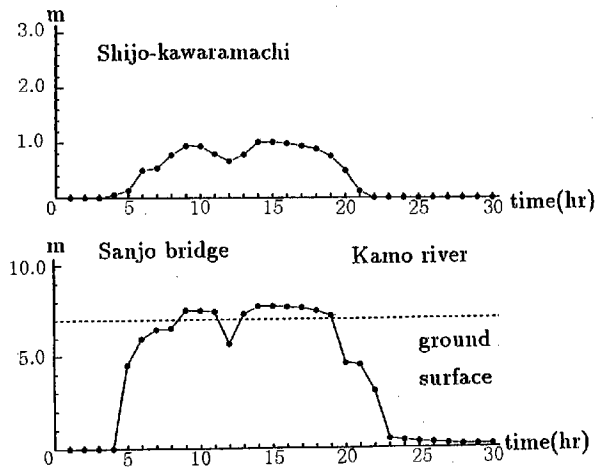


Fig.15 Temporal change of inundation flow depth and water depth in river

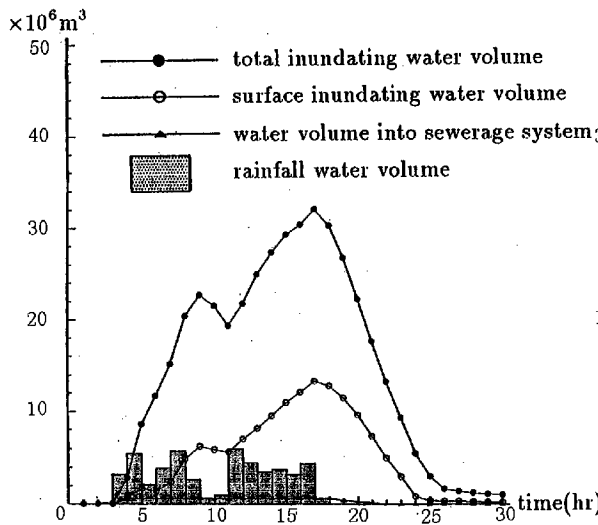


Fig.16 Temporal change of inundating water volume

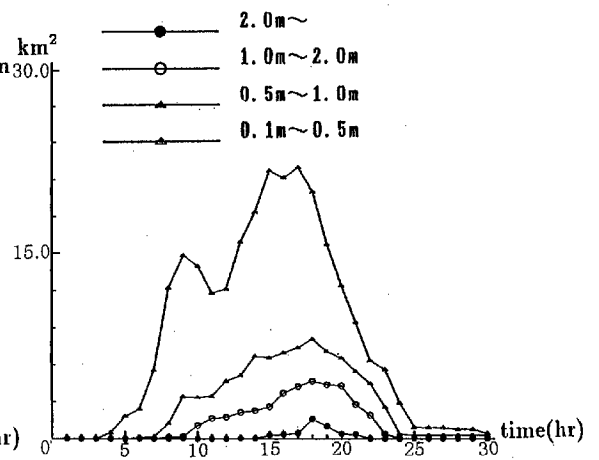


Fig.17 Temporal change of inundating water area

セスが、ここで提案したモデルにより表現できることを確認した。

(2) 昭和10年の降雨条件のもとで、現在の京都市内域での洪水氾濫状況を解析したところ、多少の違いはあれど、昭和10年の洪水氾濫実績と概ね一致した結果が得られた。

(3) 現在、仮に昭和10年と同規模の豪雨が発生した際には、鴨川沿いの京都の中心部で最大1m程度の氾濫が生じることが予想され、地下街や地下駅にも氾濫水が浸入し、甚大な被害が生じる可能性があることが知られた。

今後取り組むべき課題としては多くのことが考えられるが、その中で重要なものとして以下のことが挙げられよう。

(1) 今回用いている幹線下水道モデルでは、下水道内の流れを連続式、運動量式を用いて解析していない。また合流式、分流式下水道で河川に排水され

るものに関しては明確なモデル化がなされておらず、現在のところ、その排水量は、市街地モデル中の地表氾濫水の河川への流出流量のなかに一部が含まれていると解釈される程度である。下水道モデルの改良が今後の重要な課題である。

(2) 中小河川の水は最終的に桂川、宇治川に排水されるが、その排水の挙動は両河川の水位に大きく支配される。今後、桂川、宇治川の不定流計算もあわせて実施し、市内中小河川の外水系への排水機構をモデルの中に組み込む必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたって京都市内の河川、下水道の詳しい資料を提供いただきました京都府河川課、京都市建設局、下水道局の関係者各位に深甚なる謝意を表します。また、計算や図表作成で協力いただいた京都大学大学院生の前田修氏、横尾英男氏にもあわせて謝意を表します。

参考文献

- 井上和也(1986): 開水路非定常流の数値計算法とその水工学への応用に関する研究, 京都大学学位論文, pp.172-177.
- 井上和也・戸田圭一・林秀樹・川池健司・坂井広正(1998): 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.
- 市川温・立川康人・椎葉充晴(1998): 河川流域地形の新たな数理表現とそれに基づく分布流出型モデルの構成, 第17回日本自然災害学会学術講演会, pp133-134.
- 岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文(1980): 氾濫水の水理の数値解析法, 京都大学防災研究所年報第23号B-2, pp.305-317.
- 京都市役所(1936): 京都市水害誌, 253pp.
- 京都市下水道局総務部庶務課(1997): 京都の下水道, No.8, 22pp.
- 椎葉充晴・立川康人・市川温・堀智晴・田中賢治(1998): 圃場容水量・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.

Modeling of Overland Flood Flow due to Heavy Rainfall in Urban Area

Kei-ichi TODA, Kazuya INOUE, Satoshi MURASE* and Yutaka ICHIKAWA

*Osaka Gas Co.Inc.

Synopsis

The mathematical model which can simulate inundation process in urban area due to heavy rainfall has been newly developed. In this model, the network model in which streets, rivers and channels are treated as a channel network is used. The rainfall is taken into account as a lateral inflow and a simplified sewerage model is also incorporated. The discharge hydrographs obtained by the runoff analysis in the surrounding mountainous area are imposed as the upstream boundary conditions. The model was applied to Kyoto city area. The computed results show a good agreement with the record of inundation depth distribution in 1935. It is also verified that this model can express the inundation process, namely, the temporal change of inundation water volume and inundation area.

Keywords : *inundation flow analysis, runoff model, heavy rainfall, sewerage system, urban area*