

## 都市における洪水氾濫

### —大規模な洪水氾濫模型装置を用いた実験と解析—

中川 一・石垣泰輔・武藤裕則・井上和也・戸田圭一  
多河英雄・吉田義則・辰巳賢一・張 浩\*・八木博嗣\*

\* 京都大学大学院工学研究科

#### 要 旨

都市域における洪水氾濫の危険性を行政および住民が正しく認識し、災害時にあつては適切な避難等を行うには、高精度な洪水ハザードマップの作成と公表が重要である。従来、洪水ハザードマップ作成の基礎となる洪水氾濫解析モデルの妥当性については、小規模でかつ単純な模型実験装置を用いたデータで検証されてきたため、モデルの検証が十分なされてこなかった。本研究では、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーに設置された大規模な洪水氾濫模型実験装置を用いて市街地における洪水氾濫模型実験を行い、地上部における氾濫特性や地下空間への流入流量を把握するとともに、数値解析を実行して氾濫モデルの妥当性を検討した。

キーワード： 都市水害，洪水氾濫，水理模型実験，地下浸水，数値シミュレーション

#### 1. はじめに

洪水や高潮の氾濫災害を防止・軽減するには堤防や防潮堤などによるハード対策はもちろん、避難・予警報システムなどのソフト対策を充実していくことが重要であることは論をまたない。避難がうまくいくかどうかは情報伝達システムが整った上で、地域住民と行政とが地域の洪水・高潮氾濫危険度を十分熟知していることにかかっている。そのためには住民と行政とが情報を共有し、互いの信頼関係を高めておく必要がある。洪水・高潮ハザードマップは洪水・高潮氾濫危険度情報を提供するものであつて、住民と行政が地域の洪水や高潮に対する脆弱性の情報を互いに共有できる有効な手段である。洪水氾濫の危険性は、洪水の規模や防御システムの健全度に大きく依存する。したがって、洪水ハザードマップはこれらの条件を的確に評価して作成されなければならない。また、これらが的確に評価できたとしても、複雑な場における氾濫水の挙動を正確に表せるモデルが必要である。

各市町村等で現在作成・公表されている洪水ハザードマップは基本的には250mメッシュが用いられてお

り、道路や建物、中小河川等の地物の形状を適切に表しにくい。ため氾濫水の挙動も正確に表しにくい。

福岡ら<sup>1)</sup>は縮尺1/100の市街地模型を用いた水理模型実験を行い、氾濫水の主流は道路に沿って流れることから、これを再現するために一般曲線座標系を用いた氾濫解析を行っている。しかし、一般曲線座標系では主流に沿って座標系を設定しても、細街路や氾濫形状に大きく影響する構造物等は考慮しにくい。

川池<sup>2)</sup>は大阪市の港区・西区を対象とした高潮氾濫解析を実施する際に、氾濫解析手法としてデカルト座標系モデル、一般曲線座標系モデル、非構造格子モデル、および街路ネットワークモデルを取り上げ、それぞれのモデルの利害得失を検討し、解析目的に応じてモデルを使い分け、各モデルの特長を活かすことが重要であるとしている。そして、地上での氾濫解析には境界や街路をある程度適切に表現し得る非構造格子モデルを推奨し、高潮氾濫解析や土砂氾濫・堆積の解析等にこのモデルを用いている<sup>3)</sup>。重枝ら<sup>4)</sup>も川池と同様に非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面二次元の洪水氾濫流モデルを提案し、水理模型実験によりモデルの妥当性を検証している。

本研究においては、都市域における氾濫水の挙動に関して水理模型実験を行い、実験結果を再現し得る数値解析モデルの適用性について検討する。その際、地上での氾濫のみならず、地下空間への浸水についても模型実験及び計算で検討する。

## 2. 都市域における氾濫実験

### 2.1 実験対象地域の概要

洪水氾濫実験の対象地域は、京都市内を流れる鴨川の右岸地帯である。この地域では昭和10年の6月27日～29日の豪雨（総降水量290.5mm、京都地方気象台）により、鴨川や桂川が氾濫し橋梁のほとんどが流失した。これによる被害は、死者12名、負傷者71名、家屋の全壊・流失222戸、家屋の半壊260戸、床上浸水12,335戸、床下浸水30,954戸、堤防の破損398箇所、橋梁破損74基にのぼり、市内全域が壊滅的な被害を受けた。

京都市はこの災害以降、幸いにもこれを上回るような被害を経験していない。堤内地はこれ以降今日に至るまで人口と資産の集中が進み、地下鉄や地下街の発達など、最近急激に都市構造が複雑化・高度化している。しかしながら、河川そのものの抜本的な治水整備水準の向上や都市耐水化等の総合的な治水対策の向上が図られてきたとは言いがたい。

このような状況にあって、昭和10年と同程度の規模の氾濫が生じたときに地上でどのような氾濫規模・形態となるのか、地下への浸水でどのような事態が生じる可能性があるのか、危機管理としてどのような事態を想定しておかなければならないのか等を検討しておくことが重要である。

### 2.2 実験の概要

実験装置はFig.1に示すように、京都市街地を模擬したもので、南北を御池通と高辻通とで、東西を鴨川と烏丸通で囲まれた区域を対象とした。模型の縮尺は1/100であり、南北20m、東西10mの大規模な市街地模型である。このような大規模な市街地内での個々の家

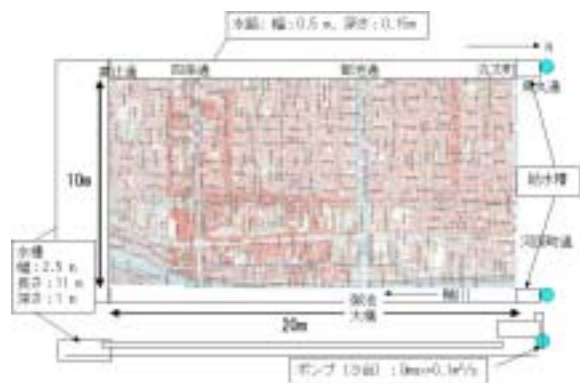


Fig.1 Experimental apparatus for flooding

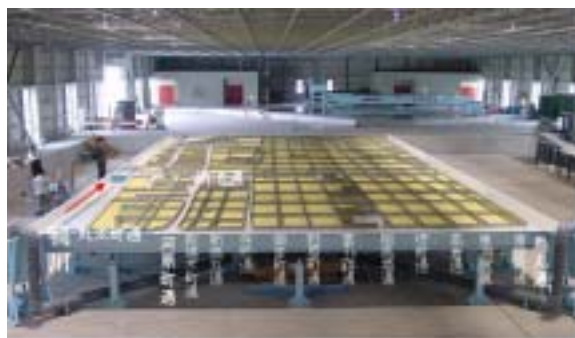


Fig.2 Streets and blocks of building on the flooding table

屋やビルを模擬するのは煩雑なため、ここではFig.2に示すように、市街地をいくつかのブロック（街区）に分け、街路網とこれらのブロックからなる氾濫場とした。烏丸御池付近には地下にショッピングモールのゼスト御池、地下駐車場、地下鉄東西線の御池駅があり、模型でも地下駐車場、地下鉄、地下モール街等への入り口を設けている（Fig.3）。なお、街区は不透過あるいは透過に設定でき、今回は不透過とした。また、地下空間への浸水がある場合と無い場合を検討する。

実験方法は以下のようなものである。すなわち、鴨川に1ℓ/sの流量を定常的に与え、鴨川の御池大橋下流で流れを堰き止めて御池大橋付近から越流させて洪水氾濫を発生させた。氾濫範囲は実験装置上部より9台のビデオカメラで、氾濫水深は適当な地点において超音波



Fig.3 Locations of entrance into underground space

式水位計で計測した。

地下空間への流入流量および南北に走る通りから実験領域外へ流出する流量を流量堰を用いて計測した。なお、実験の詳細は防災研究所技術室からも本誌に報告されているのでそちらを参照願いたい。

## 3. 氾濫解析モデル

洪水氾濫解析には川池<sup>2)</sup>が開発した非構造格子モデルを用いることとする。用いた基礎方程式系はデカルト座標系で表すと以下のような平面二次元の浅水流方

程式である。

(連続式)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

(運動量式)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (3)$$

ここに、 $h$  : 水深、 $u, v$  : それぞれ  $x, y$  方向の流速成分、 $M, N$  : それぞれ  $x, y$  方向の流量フラックス ( $M = uh, N = vh$ )、 $H$  : 水位 ( $H = h + z$ ,  $z$  は地盤高)、 $\tau_{bx}, \tau_{by}$  : それぞれ  $x, y$  方向の底面せん断応力であり、抵抗則にManning式を用いるとそれぞれ以下のように表せる。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

ここに、 $\rho_w$  : 水の密度、 $g$  : 重力加速度、 $n$  : Manningの粗度係数、 $t$  : 時間、 $x, y$  : 水平方向にとったデカルト座標系の座標値である。これらの基礎式の差分化については、時間項には前進差分、移流項にはDoner Cellスキーム、底面摩擦項にはVasilievの不安定を避けるため局所的implicitな形式を用いた中央差分、それ以外の項には中央差分をそれぞれ適用する。

本研究では、計算領域を任意の形状に分割した非構造格子を適用して都市域での氾濫水の挙動を解析する。まず、計算領域を多角形の非構造格子 (形状および配列に規則性を持たない解析格子) に分割する。ついで、全領域に対して直交 (デカルト) 座標軸 ( $x$  軸、 $y$  軸) を設定し、Fig.4に示すようにこの座標系における各方向の流量フラックス ( $M, N$ )、および流速 ( $u, v$ ) を非構造格子の境界 (多角形の辺の中点) で、水深 ( $h$ ) を非構造格子の図心 (多角形の重心) で定義し、

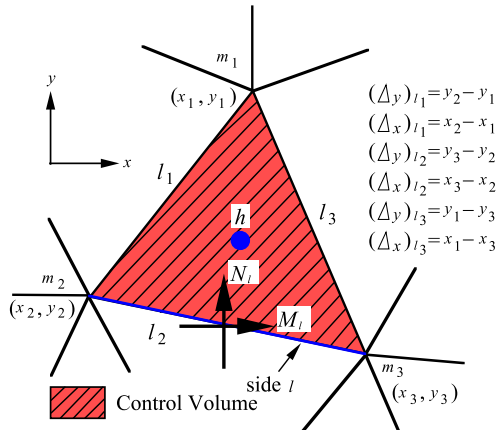


Fig.4 Control volume for continuity equation and arrangement of variables

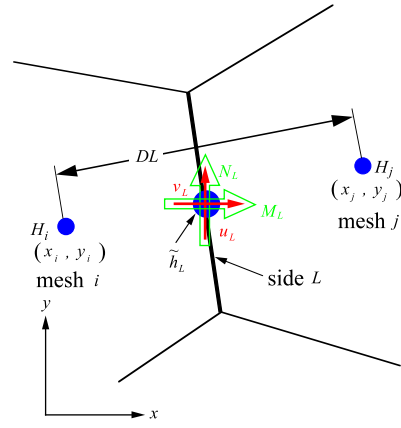


Fig.5 Variables used in the calculation of momentum

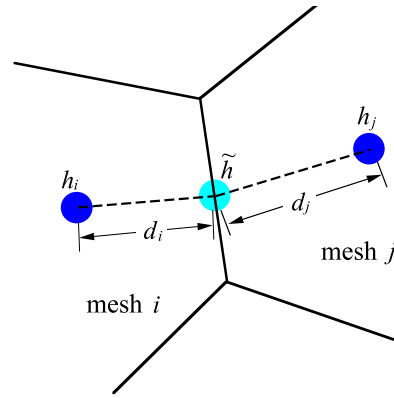


Fig.6 Interpolation of flow depth

Leap-Frog法を用いて時間発展させる。なお、非構造格子モデルの氾濫計算に用いる基礎式は式(1)~(3)の浅水流方程式である。

有限体積法を用いて(1)~(3)式を積分すると以下のようである。すなわち、

(連続式)

$$\frac{h_i^{n+3} - h_i^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{A} \sum_{l=1}^m \{M_l^{n+2}(\Delta y)_l - N_l^{n+2}(\Delta x)_l\} = 0 \quad (6)$$

(運動量式)

$$\frac{M_L^{n+2} - M_L^n}{2\Delta t} + M1 + M2 = -g\tilde{h}_L^{n+1}(\nabla H)_x - T_x \quad (7)$$

$$\frac{N_L^{n+2} - N_L^n}{2\Delta t} + N1 + N2 = -g\tilde{h}_L^{n+1}(\nabla H)_y - T_y \quad (8)$$

ここに、

$$(\nabla H)_x = \frac{H_j^{n+1} - H_i^{n+1}}{DL} \cdot \frac{x_j - x_i}{DL} \quad (9)$$

$$(\nabla H)_y = \frac{H_j^{n+1} - H_i^{n+1}}{DL} \cdot \frac{y_j - y_i}{DL} \quad (10)$$

であり、 $DL$  はFig.5に示すように隣り合う多角形の重心間距離である。また  $\tilde{h}$  はFig.6に示すように辺の中点上の水深で、

$$\tilde{h} = \left( \frac{h_i}{d_i} + \frac{h_j}{d_j} \right) / \left( \frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_j} \right) \quad (11)$$

で表される。 $T_x$ ,  $T_y$  は底面における抵抗項であり、それぞれ

$$T_x = \frac{g\tilde{n}^2 \frac{M_L^{n+2} + M_L^n}{2} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2}}{(\tilde{h}_L^{n+1})^{4/3}} \quad (12)$$

$$T_y = \frac{g\tilde{n}^2 \frac{N_L^{n+2} + N_L^n}{2} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2}}{(\tilde{h}_L^{n+1})^{4/3}} \quad (13)$$

で表される。

$M1+M2$  および  $N1+N2$  は移流項であり、それぞれ以下のように表される。

$$M1+M2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^m \{u_l^n \hat{M}_l^n (\Delta y)_l - v_l^n \hat{M}_l^n (\Delta x)_l\} \quad (14)$$

$$N1+N2 = \frac{1}{A_{cv}} \sum_{l=1}^m \{u_l^n \hat{N}_l^n (\Delta y)_l - v_l^n \hat{N}_l^n (\Delta x)_l\} \quad (15)$$

ここに、

$$\hat{M} = \left( \frac{M_1}{d_1} + \dots + \frac{M_m}{d_m} \right) / \left( \frac{1}{d_1} + \dots + \frac{1}{d_m} \right) \quad (16)$$

$$\hat{N} = \left( \frac{N_1}{d_1} + \dots + \frac{N_m}{d_m} \right) / \left( \frac{1}{d_1} + \dots + \frac{1}{d_m} \right) \quad (17)$$

のようになる。

$u_l^n \hat{M}_l^n$ ,  $u_l^n \hat{N}_l^n$  について：であり、 $d_1 \dots d_m$  はFig.7に示すように、多角形の重心から各辺の中心までの距離で

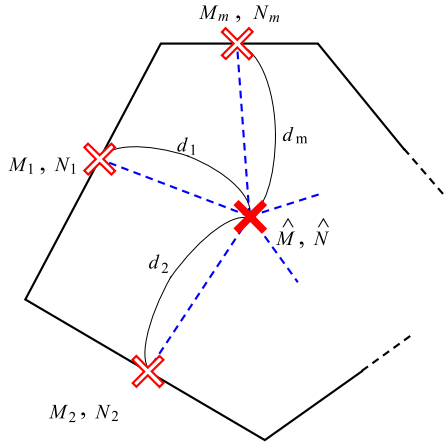


Fig.7 Interpolation of flow fluxes

ある。

(14), (15)式において風上差分を用いると各項は以下のようになる。

$$u_l^n \cdot (\Delta y)_l \geq 0 \text{ のとき } \begin{cases} \hat{M}_l^n = (\hat{M}_l^n)_{in} \\ \hat{N}_l^n = (\hat{N}_l^n)_{in} \end{cases} \quad (18)$$

$u_l^n \hat{M}_l^n$ ,  $u_l^n \hat{N}_l^n$  について：

$$u_l^n \cdot (\Delta y)_l < 0 \text{ のとき } \begin{cases} \hat{M}_l^n = (\hat{M}_l^n)_{out} \\ \hat{N}_l^n = (\hat{N}_l^n)_{out} \end{cases} \quad (19)$$

$v_l^n \hat{M}_l^n$ ,  $v_l^n \hat{N}_l^n$  について：

$$v_l^n \cdot (\Delta x)_l \geq 0 \text{ のとき } \begin{cases} \hat{M}_l^n = (\hat{M}_l^n)_{out} \\ \hat{N}_l^n = (\hat{N}_l^n)_{out} \end{cases} \quad (20)$$

$v_l^n \hat{M}_l^n$ ,  $v_l^n \hat{N}_l^n$  について：

$$v_l^n \cdot (\Delta x)_l < 0 \text{ のとき } \begin{cases} \hat{M}_l^n = (\hat{M}_l^n)_{in} \\ \hat{N}_l^n = (\hat{N}_l^n)_{in} \end{cases} \quad (21)$$

ここに、 $(\hat{M}_l^n)_{in}$ ,  $(\hat{M}_l^n)_{out}$ ,  $(\hat{N}_l^n)_{in}$  および  $(\hat{N}_l^n)_{out}$  は、おのおのFig.8に示すような多角形の重心で定義された流量フラックスである。

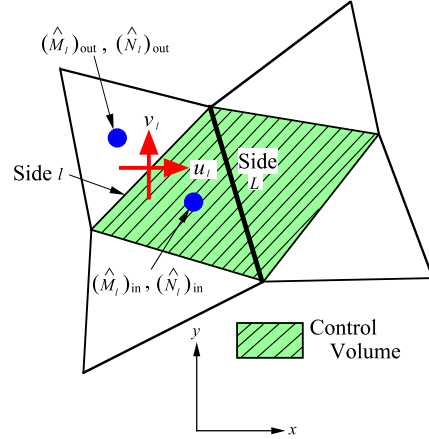


Fig.8 Control volume used in the calculation of convection terms in momentum equations

#### 4. 都市域における氾濫の解析

Fig.9は越流地点における表面流速および氾濫水深から読み取った氾濫流量に関する実験結果である。定常状態においては給水量 (1ℓ/s) 全てが氾濫するように設定されており、Fig.9では若干変動しているもののほぼこれに近い値となっていることがわかる。そこで、この氾濫ハイドログラフを流入境界条件として氾濫計算を行った。

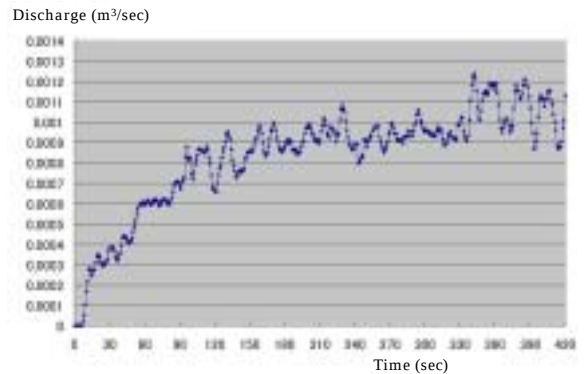


Fig.9 Inflow discharge at the boundary

Fig.10は非構造格子を用いて氾濫場をメッシュ分割したものである。住区ブロックは不透過メッシュとしている。なお、このケースは地下空間への浸水を考慮

しない場合であり、総メッシュ数は5,314個である。地下空間への浸水を考慮する場合は地下への入り口に対して新たにメッシュを設けるため、Fig.11に示すようにやや煩雑なメッシュ構造となっている。この場合の総メッシュ数は5,860個である。



Fig.10 Meshes used in the calculation (entrances into underground space are not considered)

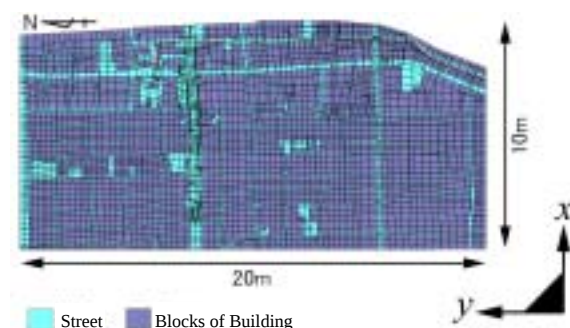


Fig.11 Meshes used in the calculation (entrances into underground space are considered)

#### 4.1 氾濫水の拡がり

Fig.12は地下空間への浸水がない場合の氾濫範囲の時間変化に関する実験結果と計算結果とを比較したものであり、氾濫開始から1, 2, 3, 5分後の氾濫範囲をそれぞれ示したものである。計算結果の方が若干氾濫範囲が広くっており、氾濫水の伝播速度が速いことが分かる。この理由として以下のようなことが考えられる。すなわち、実験では氾濫水の前縁部が進行するに伴い、前縁部の駆動力が次第に小さくなり、層流的な挙動を呈するようになる。一方、計算では層流、乱流の区別無く乱流の抵抗則を常に使用しているために抵抗を過小に評価していることによると考えられる。

Fig.13は地下空間への浸水を考慮した場合の氾濫水の拡がりに関する実験結果と計算結果とを比較したものである。Fig.12と同様、1, 2, 3, 5分ごとの結果を示している。Fig.12とFig.13の実験値同士を比較すると、地下空間への浸水を考慮した場合、氾濫の時間的な拡がり浸水を考慮しない場合に比して氾濫規模がかなり小さいことが分かる。したがって、地下空間が存在する場での氾濫水の拡がりに関しては浸水を適切

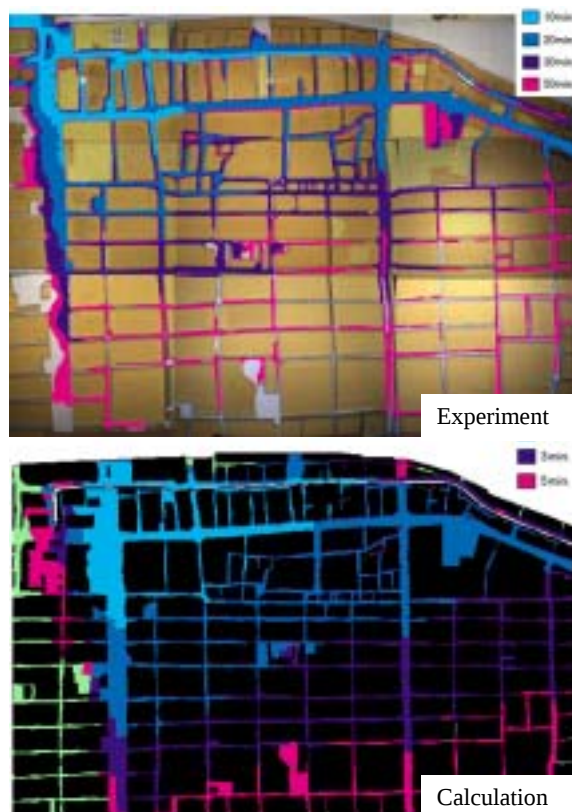


Fig.12 Comparison between flooded area in experiment and that in calculation (intrusion into underground space is not considered)



Fig.13 Comparison between flooded area in experiment and that in calculation (intrusion into underground space is considered)

に考慮した解析が必要であることが認識される。しかしながら、Fig.13の計算結果を見ると、氾濫の拡がり速度は浸水を考慮しない場合に比べると遅くなっているものの、実験値よりかなり広がりやすくなっていることが分かる。この原因として、前述した抵抗則の問題以外に、四条通における阪急の地下空間への入り口がほとんど考慮できていないということが判明している。すなわち、御池通りにおいては地下空間への入り口は街路内に存在しているのに対し、四条通においては街路内にはほとんど存在せず、多くは建物の内部から地下へと通じる階段から構成されており、建物は住区ブロックで不透過としたため浸水を考慮できなかったのである。この点についてはメッシュ分割を工夫することで解決できるものと考えられる。

## 4.2 氾濫水深

次に各地点での水深の計測結果と計算結果とを比較してみよう。Fig.14は氾濫水深の計測点を示しており、図中の各点は次のような地点である。

a : 御池大橋, b : 木屋町御池, c : 河原町御池, d : 御幸町御池, e : 三条木屋町, f : 河原町三条, g : 四条木屋町, h : 四条河原町



Fig.14 Measuring points of water level

地点 a の御池大橋近傍にはPhoto 1に示すような地下駐車場への入り口があり、若干のバンプが設けられてはいるものの氾濫が発生すればここから多量の氾濫水が地下空間へ侵入すると考えられる。

Fig.15は地下空間への浸水を考慮しない場合の各地点における氾濫水深の時間変化に関して実験結果と計



Photo 1 Entrance of underground parking lot

算結果とを比較したものである。氾濫水の大部分は地形勾配の影響（南方向に1/200の勾配で低くなっている）で木屋町通りや河原町通りに沿って南下し、西の方向（水平）へは慣性で氾濫する傾向があり、氾濫速度が遅くなると層流的な挙動をすることが実験では認められた。したがって、氾濫水の到達時間については、dやf地点のように流入境界地点から西の方向に速さがる所ほど、実験値より計算値の方が遅く伝播する傾向がある。しかしながら、氾濫水深の規模については計算結果は比較的良く実験結果を再現していることが

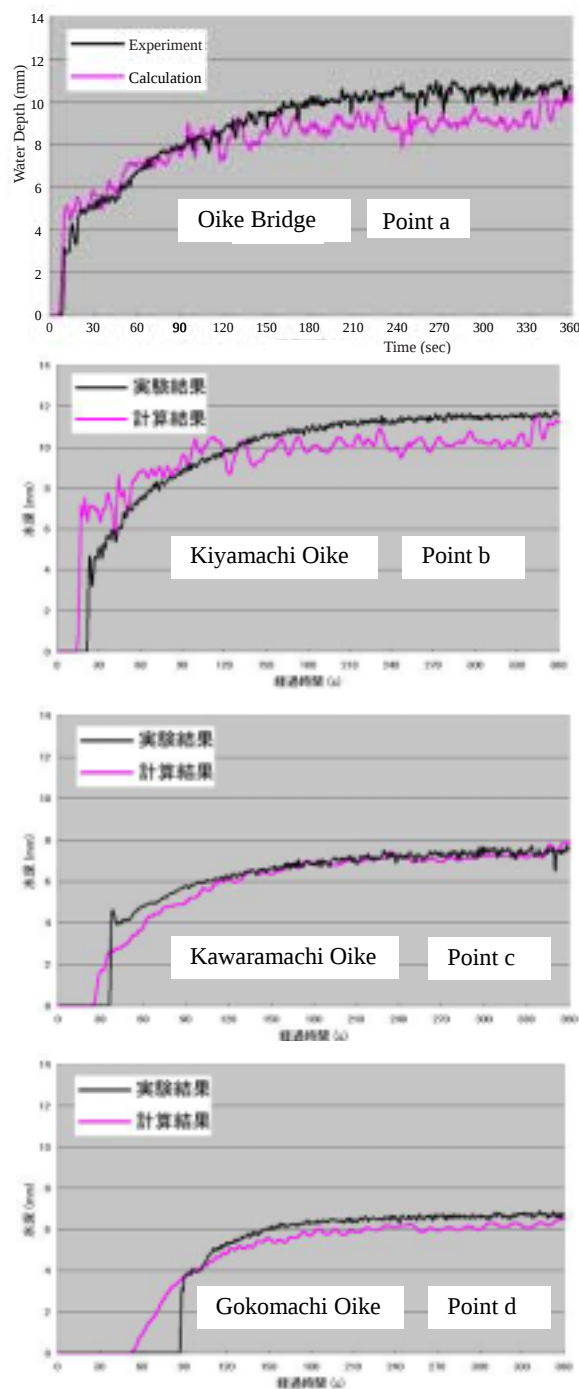


Fig.15 Comparisons between experimental water depth and calculated one (intrusion into underground space is not considered)

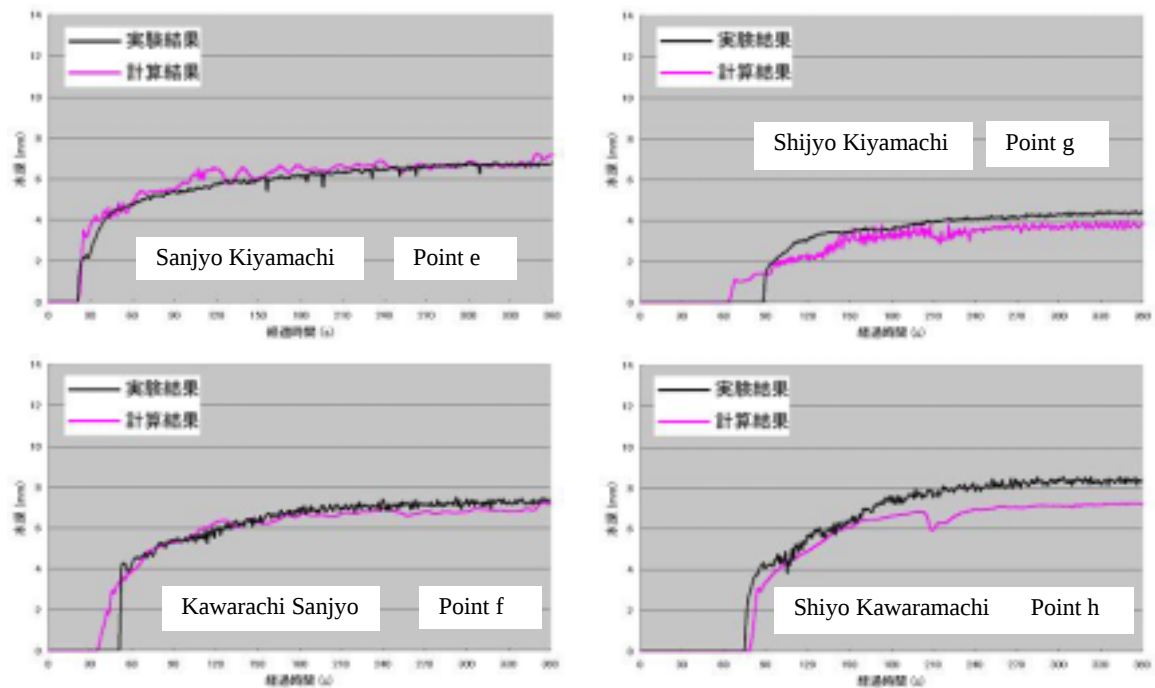


Fig.15 Continued

分かる。御池大橋や木屋町御池では氾濫水深が1cm程度（実スケールでは1m）にもなり、その他の地点では4mm～8mm（実スケールで40cm～80cm）程度になることがわかる。

一方、地下への浸水を考慮した場合の氾濫水深の時間変化に関する実験結果と計算結果との比較をFig.16に示す。氾濫水の伝播速度については、地下への浸水がない場合と同様の傾向があるが、同図より明らかに、御池大橋、御幸町御池、河原町三条、四条河

原町で計算結果と実験結果との不一致が顕著である。これは、御池大橋付近での地下駐車場への氾濫水の浸水がうまく再現できていないこと、四条通で地下への通路を配置しなかったこと等が原因していると考えられる。前者の問題点については、今回の計算では地下への浸水は段落ち流れで生じるとしているが、この場合、地下入り口近傍での局所的な水深のみで地下への流入流量が決定されることから、氾濫水の接近流速の影響が考慮できていないことになる。とくに、地下駐

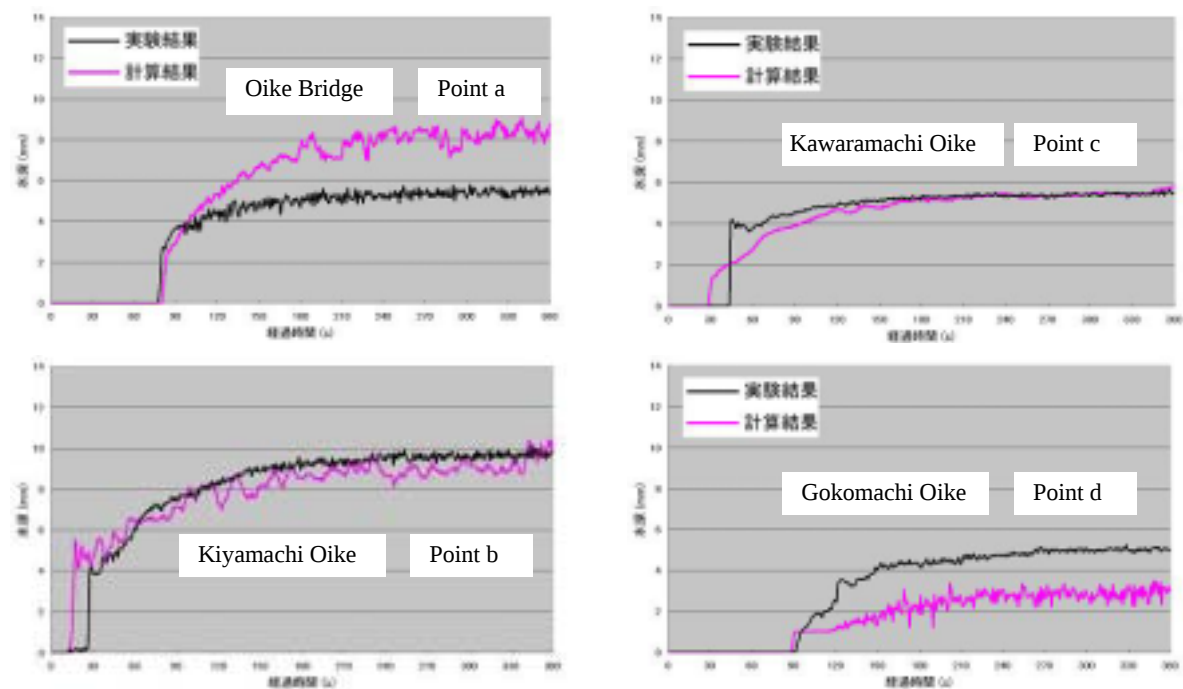


Fig.16 Comparisons between experimental water depth and calculated one (intrusion into underground space is considered)

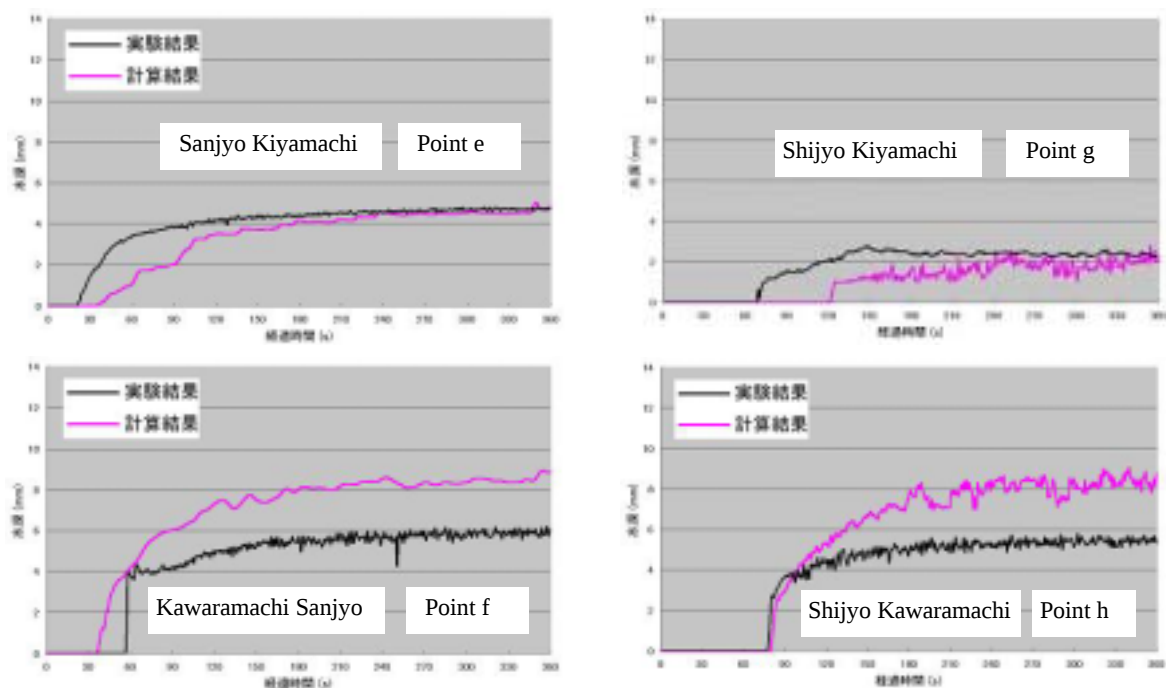


Fig.16 Continued

車場への入り口では氾濫流速の影響が大きいと考えられ、これを考慮した地下への流入流量の評価法について今後検討する必要がある。後者の問題については、街路と接する住区内に設置された地下への入り口を適切に配置し、ここからの地下への流入を考慮することである程度解決できるものと考えられる。

#### 4.3 街路を通しての流出および地下空間への浸水

Fig.17は地下への浸水がない場合における各街路か

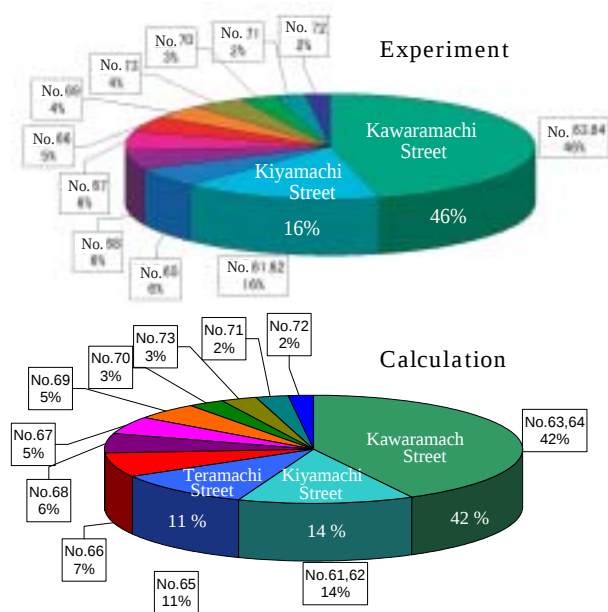


Fig.17 Comparisons of outflow discharge passing through the streets between experiments and calculations (infiltration into underground space is not considered)

ら境界外へ流出した氾濫水の総量を示したものである。実験・計算とも30分間行っている。この間に境界外へ流出した氾濫水の総量は実験では1.57m<sup>3</sup>、計算では1.53m<sup>3</sup>であり、ほぼ同程度の結果となっている。その中身を見てみると、河原町通からの流出量の割合が実験では46%、計算では42%、木屋町通では実験で16%、計算で14%というように、計算結果と実験結果は比較的良好に一致している。一方、地下空間への浸水を考慮した場合の実験結果と計算結果との比較をFig.18に示

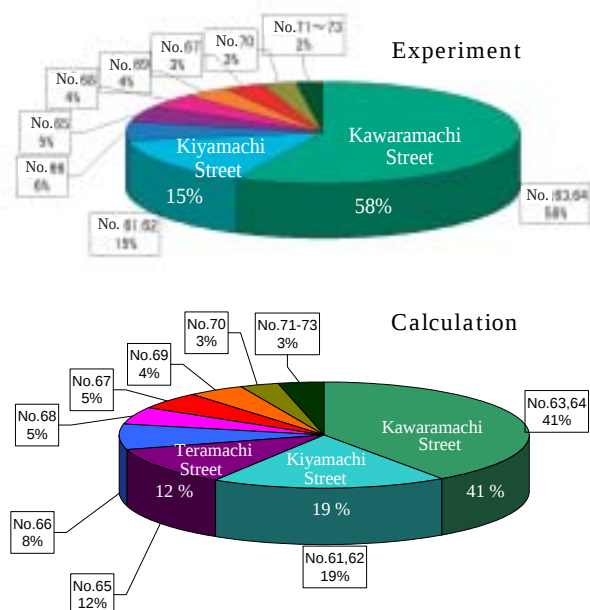


Fig.18 Comparisons of outflow discharge passing through the streets between experiments and calculations (infiltration into underground space is considered)

す。街路から流出した氾濫水の総量は実験では $0.89\text{m}^3$ 、計算では $0.98\text{m}^3$ であり、その中身は河原町通からの流出量の割合が実験では58%、計算では41%であり、木屋町通では実験で15%、計算で19%となっており、実験値と計算値の差がかなり大きくなっている。その原因はFig.19に示した地下への流入量に関する実験結果と計算結果とを比較すると理解できる。すなわち、四条通での地下への浸水量が実験では $0.3\text{m}^3$ であるのに対し、計算では $0.14\text{m}^3$ と実験値の半分以下となっていることから、四条通での地下への浸水量が地下への進入路を適切に配置しなかったために極端に小さくなっていること、また、御池地下へも地下駐車場への浸水を段落ち流れの流入条件ではうまく表せないために、実験では $0.58\text{m}^3$ であるのに対し、計算では $0.44\text{m}^3$ と違いが生じたこと等が原因で地下への浸水がある場合には、境界からの流出量に関する実験値と計算値との差が大きくなったものと考えられる。

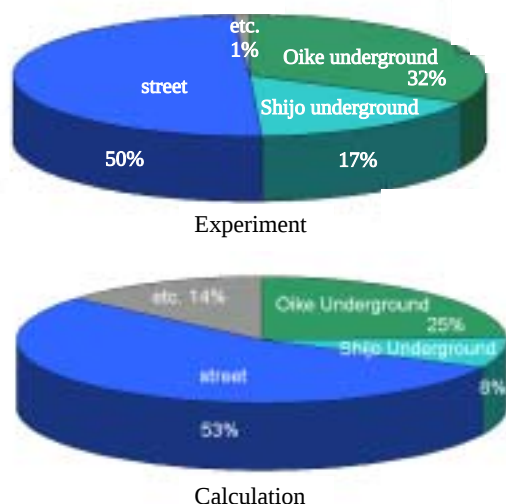


Fig.19 Comparison of experimental results and calculated ones concerning the outflow discharge in case of intrusion of flood water into underground space

## 5. おわりに

京都市の鴨川右岸地域を対象に、大規模な洪水氾濫モデルを用いた水理実験を行うとともに、実験結果と数値計算結果とを比較検討し、氾濫モデルの検討を行った。地下空間への浸水を考慮しない場合は、計算結果は比較的良好に実験結果を再現したが、地下空間への浸水を考慮した場合は、地下への浸水流量の評価が、周辺の水深のみを用いた段落ち流れではうまく再現できないことがわかった。これについては流量係数を適切に評価する方法<sup>6)</sup>や地下入り口直上流の水深を指数

表現する方法<sup>6)</sup>、接近流速の影響を考慮する方法などを用いたモデルの改良が考えられるが、これについては今後詳細な検討を行ってきたい。

これ以外についても下記のような項目について改良等を行っていく予定である。

- (1) 住区ブロックへの浸水を考慮した実験・計算
- (2) 住区への浸水に対する適切なモデルの構築 (3) 数値モデルの改良、とくに抵抗則の評価
- (4) 現実的な洪水に対する氾濫を想定した実験と計算 → 氾濫に対するシナリオの構築

## 謝 辞

本研究は、文部科学省振興調整費「都市複合空間水害の総合減災システムの開発」(代表者: 河田恵昭 京都大学防災研究所教授) の分担課題「洪水氾濫災害の危険度評価」(分担者: 井上和也 京都大学防災研究所教授) の補助を受けて実施しているものである。実験に際しては京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー内の施設を利用し、技術室の協力を得た。関係各位に記して深謝する。

## 参考文献

- 1) 福岡捷二・川島幹雄・横山 洋・水口雅教: 密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究, 土木学会論文集, No. 600/II-27, pp. 23-35, 1998.
- 2) 川池健司: 都市における氾濫解析法とその耐水性評価への応用に関する研究, 京都大学学位論文, 2001.
- 3) 川池健司・井上和也・戸田圭一・中川 一・中井勉: 急傾斜都市における土砂・氾濫災害の解析, 京大防災研年報, 第43号B-2, pp. 333-343, 2000.
- 4) 重枝未玲・秋山壽一郎・浦 勝・有田由高: 非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面2次元洪水流数値モデル, 土木学会水工学論文集, 第45巻, pp. 895-900, 2001.
- 5) 高橋 保・中川 一・野村 出: 洪水氾濫に伴う地下街浸水のシミュレーション, 京都大学防災研年報, 第33号B-2, pp. 427-442, 1990.
- 6) 刃田彰秀・井上啓由・本田洋平・古本勝弘: 直階段から地下空間へ流入する流量の評価, 土木学会水工学論文集, 第45巻, pp. 901-906, 2001.

**Inundation by River Water in Urban Cities**  
**— Experiments Using a Large Scale Inundation Model and Their Analyses —**

Hajime NAKAGAWA, Taisuke USHIGAKI, Yasunori MUTO, Kazuya INOUE, Keiichi TODA,  
Hideo TAGAWA, Yoshinori YOSHIDA, Ken-ichi TATSUMI, Hao ZHANG\*, and Hirotsugu YAGI\*

\* Graduate School of Engineering, Kyoto University

**Synopsis**

Hydraulic physical model experiments concerning the inundation by river water in Kyoto City are carried out in order to clarify the characteristics of the behavior of flooding water on a complicated city area. The physical model scale is 1/100 and it is a non-distorted model. The model can make allowance for the intrusion of flooding water into underground space. Flooding processes were simulated by using a numerical model that incorporated the finite volume method and unstructured meshes. The flooded area and depth of water in case of no intrusion of flooded water into underground space were reasonably well evaluated by this method, while in case of intrusion of water into underground space calculated results were not well evaluated. The reason is that the drop flow equation was used to estimate the discharge into underground space and that the entrances into underground space were not taken into account reasonably. The suitable equation for evaluating the discharge into underground space must be developed and also the unstructured mesh of entrances must be constituted reasonably.

**Keywords:** flood disaster in urban cities, inundation due to river flood, hydraulic physical model experiment, inundation in underground space, numerical simulation