

## 住区内での浸水を考慮した洪水氾濫の実験と解析

中川 一・石垣泰輔・武藤裕則・馬場康之・張 浩\*

八木博嗣\*・藤本幸史\*

\* 京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

非構造格子を用いた有限体積法による洪水氾濫解析手法を構築し、住区や地下空間への浸水を考慮した京都市域の1/100水理模型実験装置を用いて水理実験を行い、洪水氾濫解析モデルの検証を行った。その結果、地下空間への浸水がない場合の浸水深や浸水規模については氾濫解析モデルである程度実験結果が再現されたが、地下空間への浸水がある場合については、実験および解析にさらなる改良の必要性が認められた。また、住区への浸水をモデル化し、密集市街地での氾濫解析法を示し、実験結果をもとにモデルの検証を行った。その結果、新たに導入した開度によって住区への浸水がある程度再現できることがわかった。

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，開度

### 1. はじめに

本研究は、科学技術振興調整費「都市複合空間水害の総合減災システムの開発に関する研究」(代表者：京都大学防災研究所 河田恵昭教授)の分担課題「洪水氾濫災害の危険度評価」(分担者：京都大学防災研究所 井上和也教授)の補助を得て、平成13～15年度にかけて実施してきた研究の中で得られた成果の一部を報告するものである。昨年度は地下空間への浸水を考慮した地上部での氾濫実験とその数値シミュレーションについて報告した(中川他, 2003)。その際、地上部の住区ブロックでの浸水がなく、地下空間への浸水と地上の街路のみでの氾濫を対象とした。

実際には氾濫水は家屋と家屋の間の隙間や空き地等の空間を介して住区へも侵入し、家屋の窓やドアに隙間があればここからも氾濫水は侵入して住区内の家屋は外の浸水位と同程度に浸水して氾濫水を貯留する。この貯留は氾濫域全体の浸水範囲や浸水深に影響するものと思われ、氾濫水の挙動をより精度良く把握するには、より実際的な氾濫を想定した実験の実施とこのような場を対象とした氾濫解析法の開発が必要となる。

本研究においては、都市域における氾濫水の挙動に

関する実験結果をもとに、氾濫解析数値モデルの適用性について検討する。その際、地上部での氾濫に関しては、街路内のみでの氾濫と住区を含めた氾濫について数値解析を行い、解析手法の適用性を検討するとともに、地下空間への浸水の影響についても検討する。なお、水理模型実験の詳細については本誌に掲載されている「地下空間を含む都市洪水氾濫に関する水理模型実験」を参照されたい。

### 2. 都市域における氾濫実験の概要

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

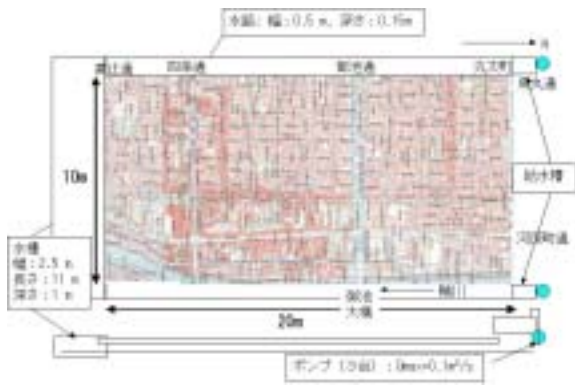


Fig.1 Experimental apparatus for flooding

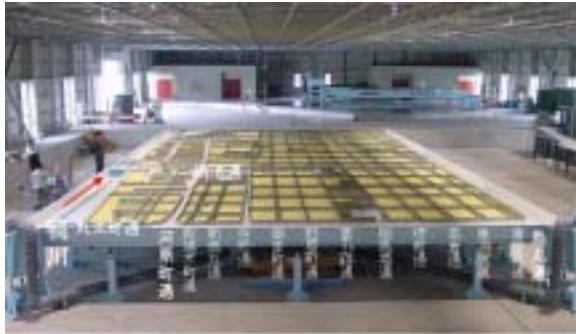


Fig.2 Streets and blocks of building on the flooding table



Fig.3 Locations of entrance into underground space

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、透過の場合には住区への浸水が生じる。今回は透過および不透過の場合について比較検討する。

住区への浸水を模擬するために街路と住区とを仕切る壁に一定の間隔 (幅2cm, 高さ3mmの隙間を壁の長さ10cmに対して1つ設置) で隙間をあげた (開度)。これは、対象とする京都の市街地を調査して得た結果をもとに設定したものである。なお、住区内には氾濫水を滞留させるための措置を講じていない。なお、住区とはビルや一般家屋が立地する区画とし、細街路も含まれるものとする。

市街地では、氾濫水は主に街路を河道のように流動するが、街路から住区へも細街路や家屋への入り口(ド

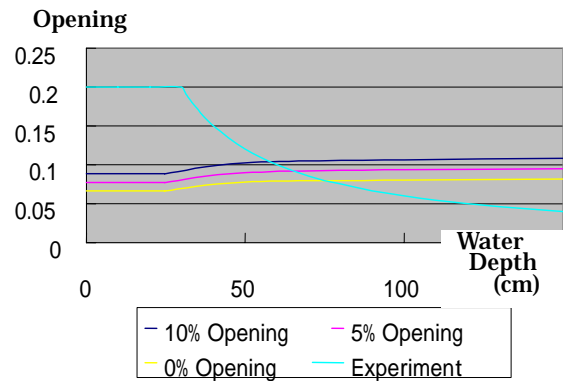


Fig.4 Openings measured in the Kyoto City and an opening used in the experiments

ア等)を通して拡がるものとする。また、開度とは街路から住区、あるいは住区から街路へ氾濫水が拡がる時、その地点の地盤高を基面とし、基面から上方に開口した空間の面積が鉛直方向の浸水面積に占める割合と定義する。Fig.4は実スケールでの浸水深と開度との関係を示したものである。模型の開度は初期には0.2であるが、浸水深が30cm (模型では3mm)を超えると開度が水深の増加につれて減少していく。これは、実験で設定した開口部の高さが3mmであり、これを超えると開度の定義より鉛直方向の面積が増加する一方で開口部の面積が固定されている (3mm×2cm) ためである。同図において、「0% Opening」あるいは「5% Opening」等とあるのは、実際の住区 (京都市) において調査した開度であり、ドアや窓が完全に閉じられている場合を「0% Opening」とし、窓やドアの面積のうち5%が開いていてそこから浸水する場合 (隙間から浸水する場合) を「5% Opening」としている。同図より、実際には若干の隙間から浸水することを考慮すると、家屋が水浸しない場合の開度は10%程度であると考えられる。

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式水位計で計測した。なお、高野川と賀茂川との合流前に賀茂川右岸が破堤した場合を想定した実験も行っているが、ここでは検討していない。

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は流量堰を用いて計測した。

### 3. 氾濫解析モデル

洪水氾濫解析には川池 (川池, 2001) 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.5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

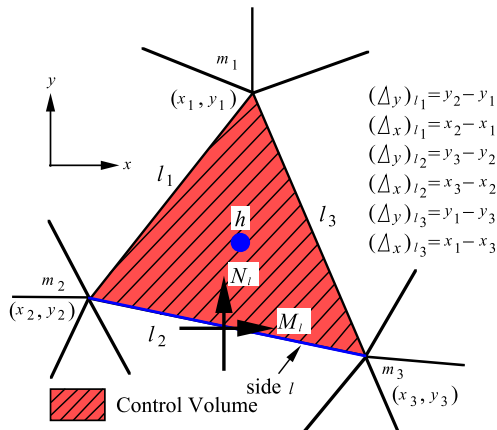


Fig.5 Control volume for continuity equation and arrangement of variables

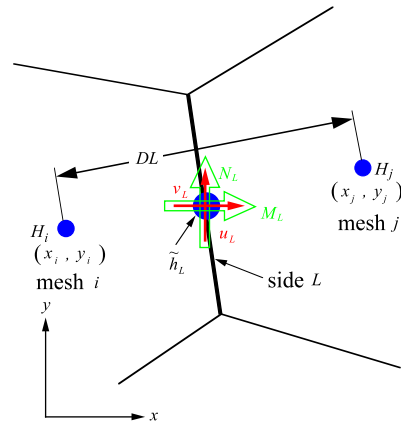


Fig.6 Variables used in the calculation of momentum

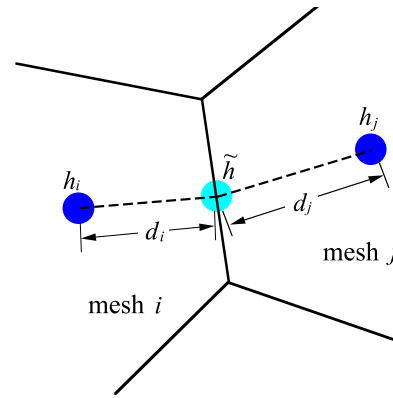


Fig.7 Interpolation of flow depth

非構造格子の図心(多角形の重心)で定義し, 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なのである。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.6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.7に示すように辺の中点上の水深で,

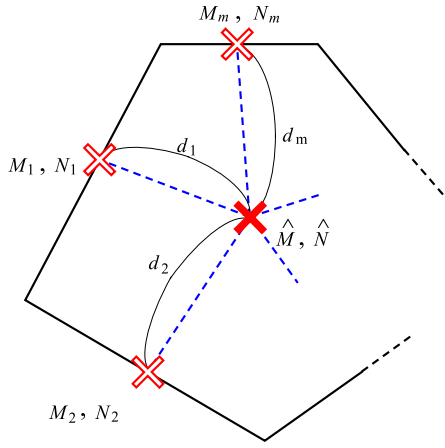


Fig.8 Interpolation of flow fluxes

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

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、

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

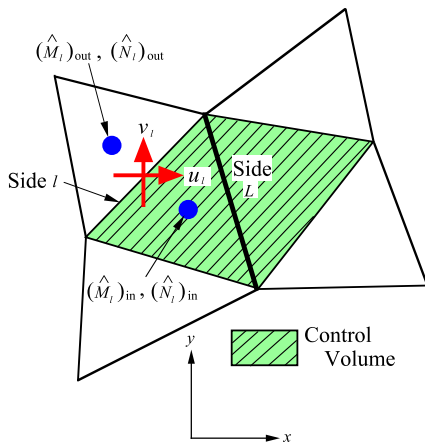


Fig.9 Control volume used in the calculation of convection terms in momentum equations

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

であり、\$d\_1 \dots d\_m\$ はFig.8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なになる。

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

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

\$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.9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。

#### 4. 氾濫解析結果とその考察

Fig.10 は氾濫計算の流入境界条件として採用した越流地点（御池大橋）におけるハイドログラフである。実験での表面流速および氾濫水深から読み取ったものである。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、変動があるものの \$t = 4\$ 分以降はほぼこれに近い値となっていることがわかる。

Discharge

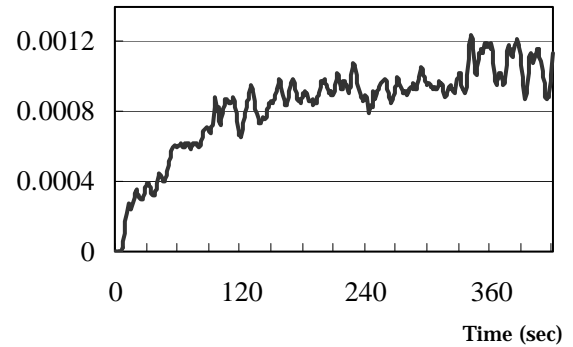


Fig.10 Inflow discharge at the boundary

Fig.11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。住区ブロックは濃い灰色で、街路メ

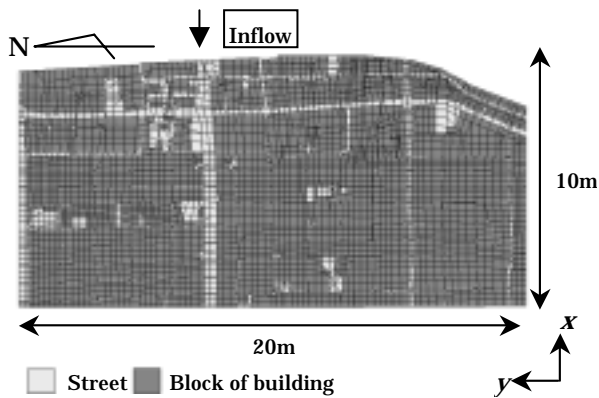


Fig.11 Meshes used in the calculation (entrances into underground space are not considered)

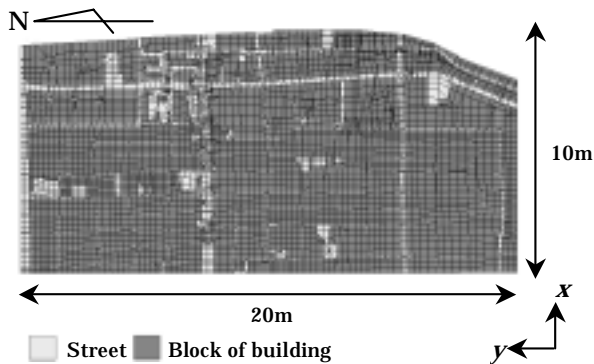


Fig.12 Meshes used in the calculation (entrances into underground space are considered)

メッシュは薄い灰色で示している。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.12に示すようにやや複雑なメッシュ構造となっている。なお、Manningの粗度係数  $n$  については、街路での等流実験から求めた  $n=0.01$  という値を用いる。また、地下空間への流入は階段を通じての段落ち流れで評価することとし、以下の式を用いた。

$$M \text{ or } N = \mu h \sqrt{gh} \quad (22)$$

ここに  $\mu$  は流量係数であり、これまでの成果を踏まえて  $\mu=1$  を用いることとする (高橋他, 1990)。

なお、(22)式で評価された  $M$  あるいは  $N$  を(1)式に代入して地下流入に伴う地上での氾濫水量を減じることとし、地下空間への流入量に制限は加えないこととする。また、住区への浸水の計算は、開度を単位幅流量に乗じることで表した。すなわち、街路と住区との境界を表すリンク上の流量フラックスに対しては、境界壁が無い条件でまず流量フラックス  $M$ 、 $N$  を計算しておき、ついでこれらを

$$M^* = \beta M, \quad N^* = \beta N \quad (23)$$

なる開度による補正を行って、住区への氾濫を考慮するものとする。

計算ケースは以下の4通りである。

- CASE 1: 街路のみでの氾濫で地下浸水無し
- CASE 2: 街路のみでの氾濫で地下浸水有り
- CASE 3: 街路と住区での氾濫で地下浸水無し
- CASE 4: 街路と住区での氾濫で地下浸水有り

#### 4.1 街路のみでの氾濫

##### (1) 氾濫水の拡がり

Fig.13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がっており、氾濫水の伝播速度が速いことが分かる。この理由として、計算では底面摩擦項のみを考慮し、水平粘性項を無視していることが考えられ、これを考慮した解析の必要性が示唆される。なお、氾濫水の先端条件としては水深に閾値を設け、これより小さい水深の格子からは氾濫水の流出は無いとしている。

Fig.14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.13と同様、1, 2, 3, 5分後の結果を示している。Fig.13とFig.14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には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

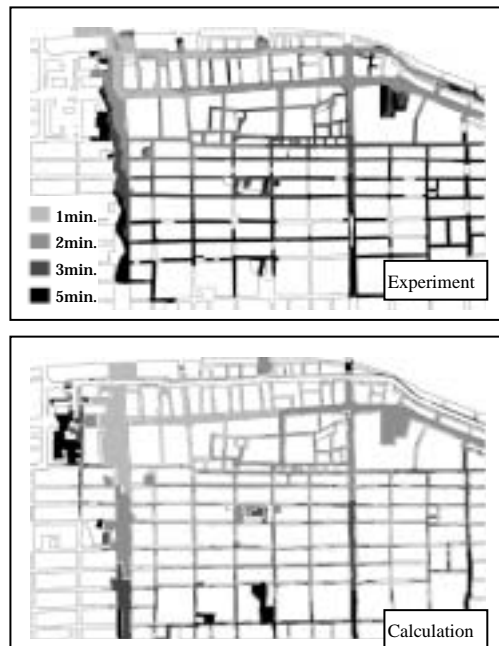


Fig.13 Comparison of flooded area between experimental and calculated results (CASE 1)

から、Fig.14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、Fig.13同様実験値よりかなり広がりやすくなっている。この原因として、前述した抵抗項の問題以外に、今回採用した地下空間への浸水量を規定する(22)式の適用性、すなわち同式では考慮していない接近流速や地形勾配の影響も考えられ、これらについてはさらに検討が必要である。

## (2) 氾濫水深

Fig.15は氾濫水深の計測点を示しており、図中の各点は以下の地点である。

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

地点 a の御池大橋近傍にはFig.16に示すような地下駐車場への入り口があり、若干のポ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

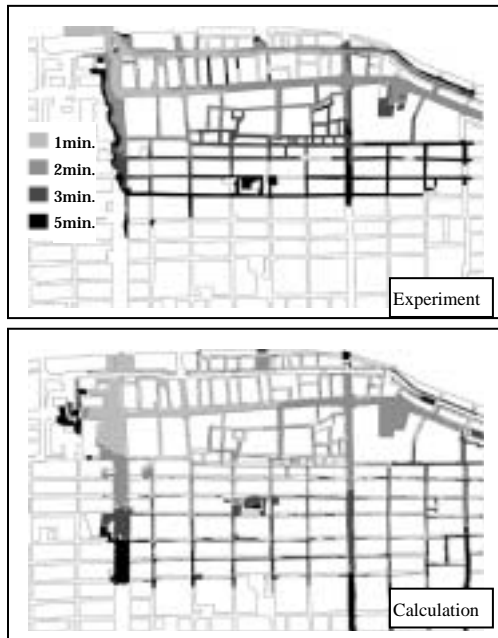


Fig.14 Comparison of flooded area between experimental and calculated results (CASE 2)



Fig.15 Measuring points of water depth

地下空間へ侵入すると考えられる。



Fig.16 Entrance of underground parking lot

Fig.17は地下空間への浸水を考慮しない場合の氾濫水深の時間変化に関して実験結果と計算結果とを比較したものの一例である。実験では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（水平勾配）へは慣性で氾濫する傾向がある。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6～8mm（実スケールで60～80cm）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.18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、同図より明らかなように、御池大橋、御幸町御池、河原町三条など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が原因の一つと考えられ、接近流速が大きなこの様な場での地下浸水量の評価方法について今後検討が必要である。

## (3) 街路を通しての流出および地下空間への浸水

Fig.19は地下への浸水がない場合における各街路か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。各地下空間への浸水量および街路を介して境界外へ流出した氾濫水量について、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.20に示す。計算では御池および四条の地下空間への浸水量が実験値より若干過大であるが、比較的良好に実験結果を再現していると言える。両者の違いの原因については、段落ち流れの適用性の問題や、

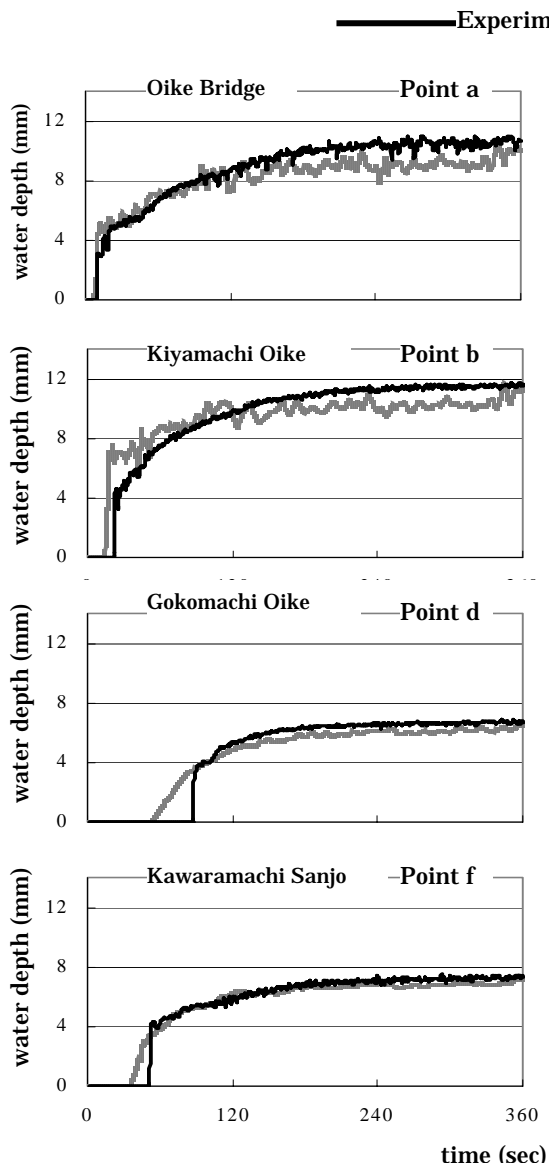


Fig.17 Comparisons between calculated and measured water depth (CASE 1)

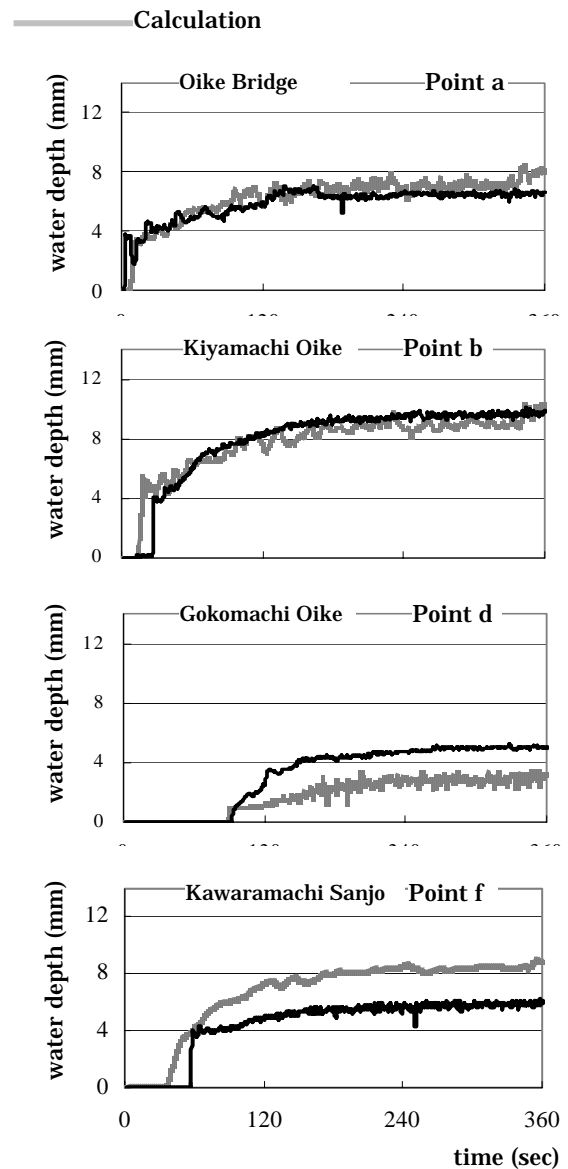


Fig.18 Comparisons between calculated and measured water depth (CASE 2)

実験では地下空間への入り口は駐車場への入り口（四角形）以外は円形となっており，計算ではその円の面積と等価な四角形の一边から段落ち流れで地下空間へ浸水するとしており，その整合性の問題が考えられる。

4.2 街路のみでの氾濫

(1) 街路・住区での氾濫

Fig.4に示したように，京都市で行った開度に関する現地調査結果から，家屋が水没しない場合の平均的な開度は10%程度であると考えられた。実験では開度は氾濫水深に依存するが，ここでは簡単のため平均的な値

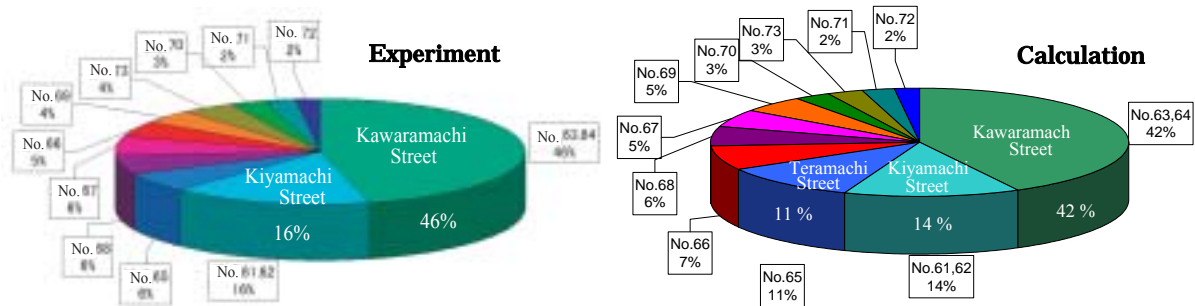


Fig.19 Comparisons of water volume flowing out through the streets between experiments and calculations (CASE 1)

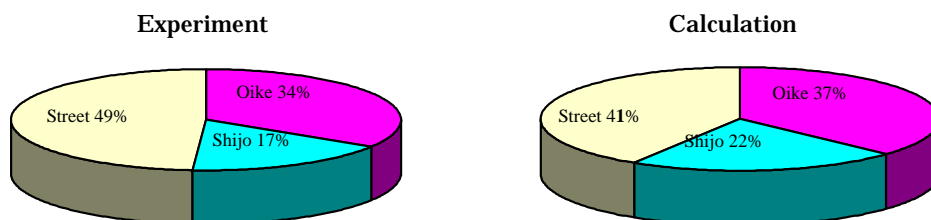


Fig.20 Comparisons between experimental and calculated water volume flowing out through the streets and volume flowing into underground space (CASE 2)



Fig.21 Comparison of flooded area between experimental and calculated results (CASE 3)

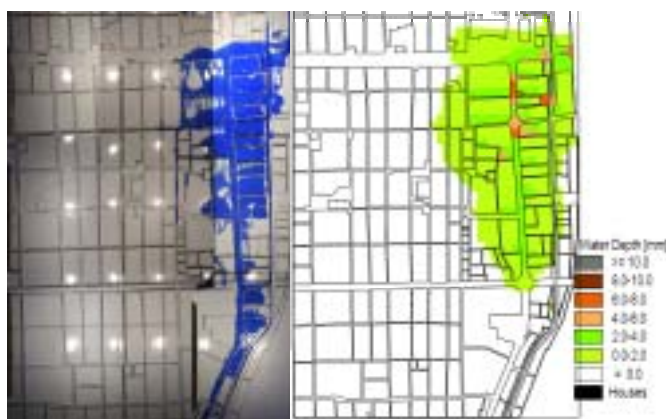


Fig.22 Comparison of flooded area between experimental and calculated results (CASE 4)

溢形状となっていることがわかる。

Fig.22は地下空間への浸水を考慮した場合の街路・住区での氾濫範囲に関する実験結果と計算結果との比較を示したものである。同図も3分後の氾濫形状を比較している。実験結果および計算結果とも地下空間への浸水により、地上部での氾濫規模が小さくなっており、地下空間への浸水が有意な影響を与えていることが分かる。計算結果は地下浸水を考慮しない場合と同様、実験結果よりも若干拡がりやすくなっているが、比較的良く実験結果を再現していると言えよう。

として10%を採用することとする。

Fig.21は氾濫開始から3分後の地下浸水がない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。なお、計算結果においては開度を考慮した場合(b)と考慮しない場合(c)とを比較のために掲載している。同図より、開度を考慮した場合の計算結果は実験結果より若干拡がり範囲が過大であるが、実験結果の傾向を比較的良く再現している。一方、開度を考慮しない場合は氾濫場に地物が存在していないこととなり、下側(南側)に行くほど拡がりの規模が大きく計算され、実験結果の傾向とは違った氾

## (2) 氾濫水深

Fig.23は地下空間への浸水がない場合の街路・住区での氾濫水深の実験結果と計算結果とを比較したものである。計算では氾濫水の到達時間が実験値よりも若干早いのが、浸水深は比較的良く一致していることがわかる。

## 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。街路のみでの氾濫および街路と住区での氾濫に対



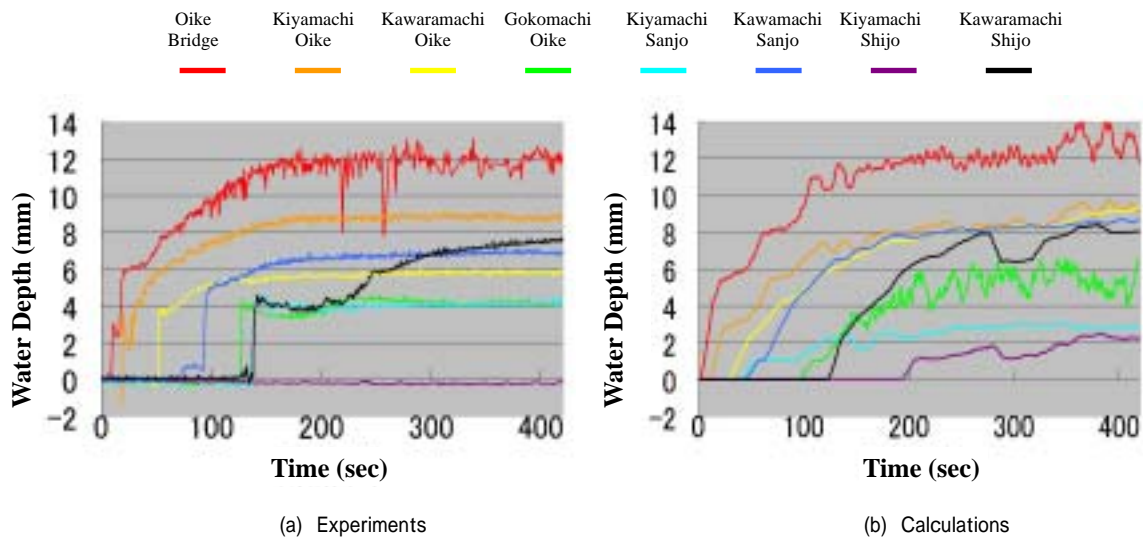


Fig.23 Comparisons between calculated and measured water depth (CASE 3)

し、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再現性が余り良く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(高橋他, 1990) 地下入り口直上流の水深を指数表現する方法(埴田他, 2001), 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。また、実験では地下空間への入り口は駐車場への入り口(四角形)以外は円形となっており、計算ではその円の面積と等価な四角形の一辺から段落ち流れで地下空間へ浸水するとしており、その整合性の問題が考えられる。

氾濫水の拡がりについては計算結果が実験結果よりも若干拡がりやすいことが分かった。これについては運動量式において水平粘性項を無視した解析を行っていることも原因と考えられ、抵抗則の改良が望まれる。また、開度を新たに導入して住区での氾濫水の挙動を数値解析により検討した。今回、一定の開度を仮定したが、水深に依存するような形で数値計算に組み込む必要がある。しかしながら、今回の実験の再現計算に限っては、一定の開度を与えた計算によっても氾濫形状や浸水深を比較的良好に再現し得たと言えよう。

現在作成されている洪水ハザードマップにおいては氾濫場の地物が十分考慮されているとは言えず、与えられた境界条件のもとで今回行ったような計算を実行することにより、時空間的により詳細な氾濫状況をマップに組み込むことができるものと思われる。また、マップに掲載しきれない情報は動画としてホームページ等に提示することも可能であり、地上・地下等が複雑に存在する高度化した都市域においてきめ細かな情報を提示し得る基礎が得られてものと考えられる。

### 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たものである。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

- 川池健司(2001): 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.
- 高橋 保・中川 一・野村 出(1990): 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.
- 埴田彰秀・井上啓由・本田洋平・古本勝弘(2001): 「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.
- 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・辰己賢一・張 浩・八木博嗣(2003): 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事件と解析, 京大防災研年報, 第46号B, pp.575-584.

## **Experiments and Calculations of Flood Water in Urban Cities**

Hajime NAKAGAWA, Taisuke ISHIGAKI, Yasunori MUTO, Yasuyuki BABA,  
Hao ZHANG\*, Hirotsugu YAGI\* and Koji Fujimoto\*

\* Graduate School of Engineering, Kyoto University

### **Synopsis**

A numerical simulation model for overland flood flow **that incorporated the finite volume method and unstructured meshes** is developed and hydraulic physical model experiments concerning the inundation by river water in Kyoto City are carried out in order to clarify the applicability of the model. 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 as well as residential area. The calculation of the flooding water into residential area is carried out using “opening” which is newly introduced in the model. The calculated results of flooded area and inundated water depth showed fairly well agreement with experimental results in case of **no intrusion of flooded water into underground space, while in case of intrusion of water into underground space calculated results were not well evaluated. More suitable evaluation of the discharge into underground space must be developed.**

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