

都市域を対象とした洪水氾濫模型実験と解析

EXPERIMENTS ON INUNDATION IN URBAN AREA BY A RIVER WATER FLOODING AND THEIR ANALYSES

中川 一¹・石垣泰輔²・武藤裕則³・八木博嗣⁴・張 浩⁵

Hajime NAKAGAWA, Taisuke ISHIGAKI, Yasunori MUTO,
Hirotatsu YAGI and Hao ZHANG

¹正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

²正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

³正会員 工博 京都大学助手 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁴学生員 京都大学大学院工学研究科 博士前期課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵学生員 京都大学大学院工学研究科 博士後期課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

Hydraulic physical model experiments concerning the inundation by river water in Kyoto City are carried out 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.

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

1. はじめに

洪水氾濫災害を防止・軽減するには堤防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氾濫危険度を十分熟知していることにかかっている。洪水ハザードマップは洪水氾濫危険度情報を提供するものであって、住民と行政が地域の洪水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。

各市町村等で作成・公表されている洪水ハザードマップは50m～250mメッシュがよく用いられており、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¹⁾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た。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²⁾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³⁾。重枝ら⁴⁾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、基礎的な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大規模な水理模型実験を行い、実験結果をもとに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検討する。

2. 都市域における洪水氾濫実験

(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（京都府資料）。

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。堤内地はこの災害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、昭和22年度に一応の対策が講じられた以降は、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は進んでおらず、現在、河川整備計画が検討されているところである。

(2) 実験の概要

実験装置は図-1に示すように、京都市街地を模擬したもので、南北を丸太町通と高辻通とで、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個々の家屋やビルを模擬するのは煩雑なため、ここでは図-2に示すように、市街地をいくつかのブロック（住区）に分け、街路網とこれらのブロックからなる氾濫場を作製した。烏丸御池付近には地下に

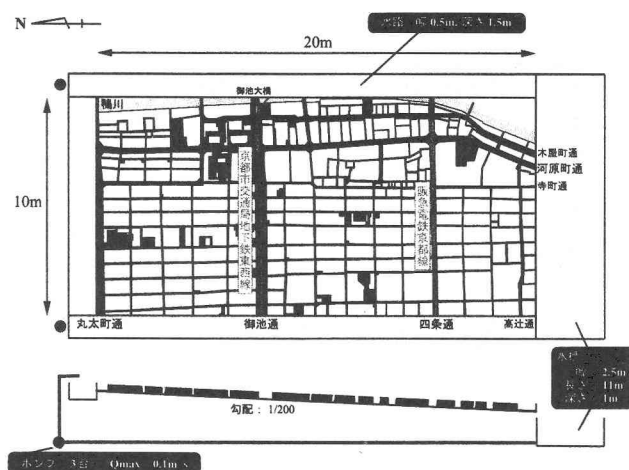


図-1 実験装置の概要

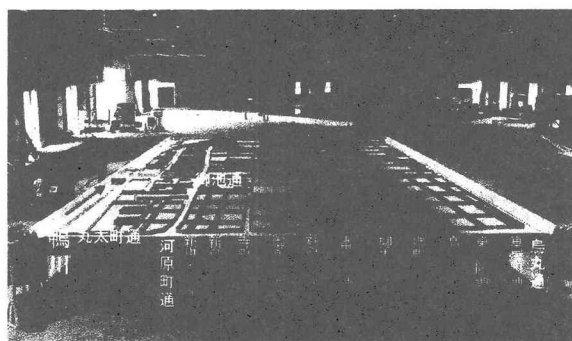


図-2 街路（白地）と住区ブロック（黄色地）

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。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。

実験方法は以下のものである。すなわち、鴨川に1ℓ/sの流量（実流量で100m³/s）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。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²⁾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）、 τ_{bx}, τ_{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。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4) \quad \tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

ここに、 ρ_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に分割する。ついで、全領域に対して直交座標軸（ x 軸、 y 軸）を設定し、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で定義し、Leap-Frog法で時間発展させる。

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)

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

(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 は隣り合う多角形の重心間距離である。また $\tilde{h}$ は多角形の各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 は底面での抵抗項であり、

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

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

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、

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

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

であり、 $d_1 \dots d_m$ は多角形の重心から各辺の中心までの距離である。

4. 都市域における氾濫の解析

図-3は氾濫計算の流入境界条件として採用した越流地点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（ 1 l/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。

図-4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

Discharge (m^3/sec)

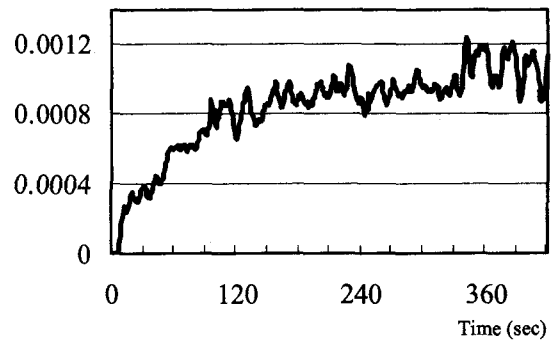


図-3 越流ハイドログラフ

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、図-5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。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。

$$M \text{ or } N = \mu h \sqrt{gh} \quad (18)$$

ここに μ 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⁵⁾。なお、(18)式で評価された M or 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

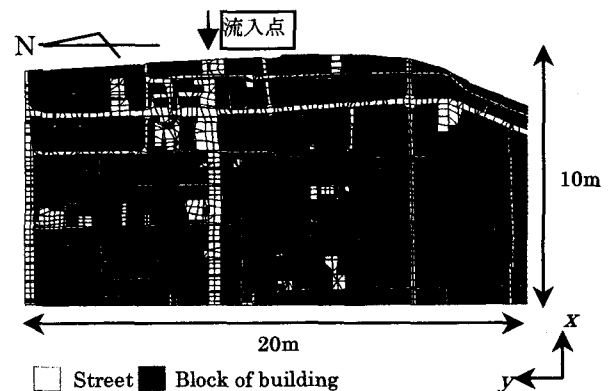


図-4 計算領域の格子分割（地下浸水無し）

入量に制限は加えないこととする。

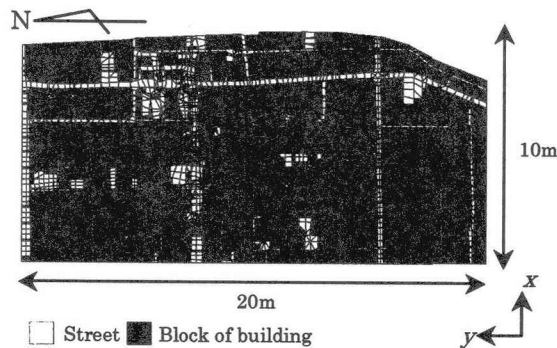


図-5 計算領域の格子分割（地下浸水有り）

(1) 氾濫水の拡がり

図-6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、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。

図-7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。図-6と同様、1, 2, 3, 5分後の結果を示している。図-6と図-7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、

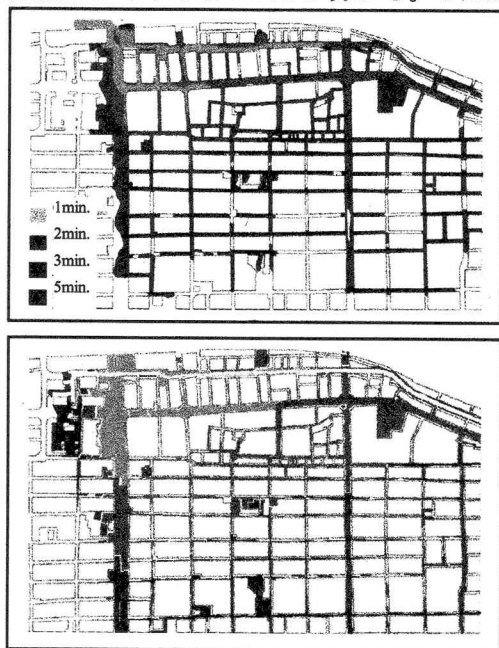


図-6 氾濫水の拡がりに関する実験結果と計算結果との比較（地下浸水無し）

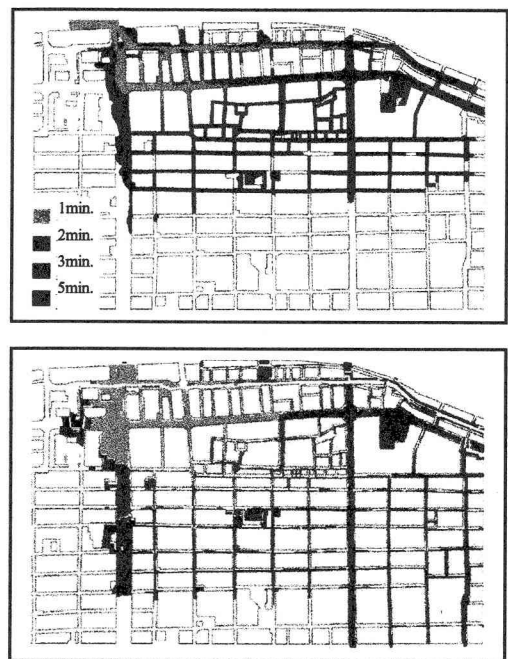


図-7 氾濫水の拡がりに関する実験結果と計算結果との比較（地下浸水有り）

地下空間が存在する場合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。しかしながら、図-7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、図-6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(18)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、これらについて検討を加える予定である。

(2) 氾濫水深

図-8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図-9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

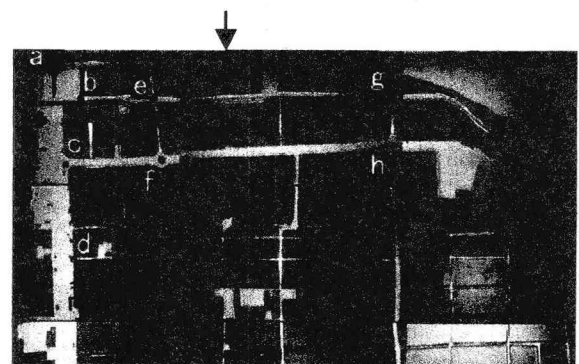


図-8 水深計測地点

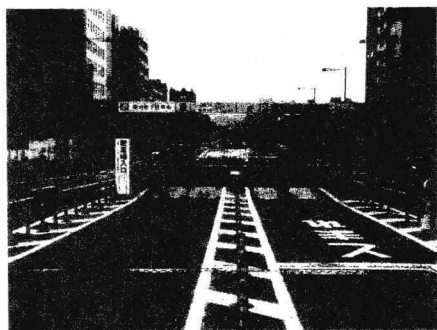


図-9 地下駐車場への入り口

氾濫水が地下空間へ侵入すると考えられる。

図-10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

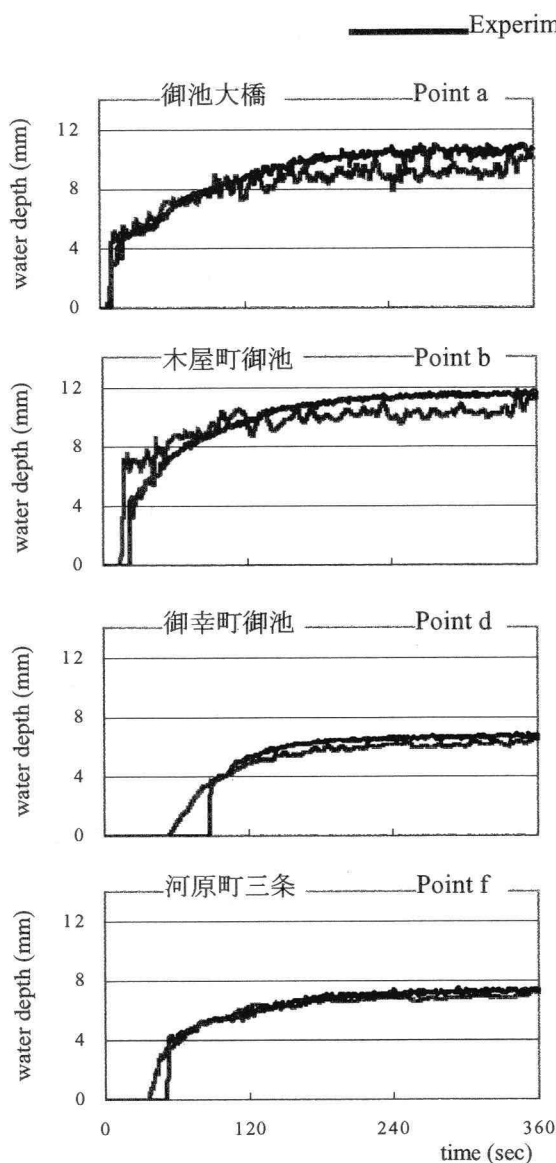


図-10 水深の計算値と実験値との比較(地下浸水無)

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図-11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

図-12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1.57m³、計算では1.53m³であり、ほぼ同程度の結果となっている。

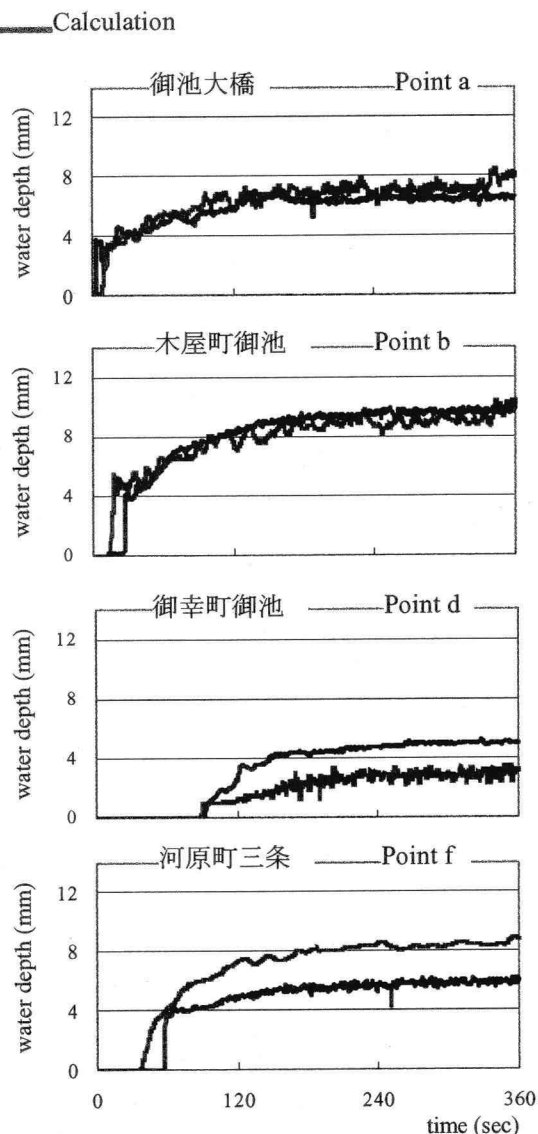


図-11 水深の計算値と実験値との比較(地下浸水有)

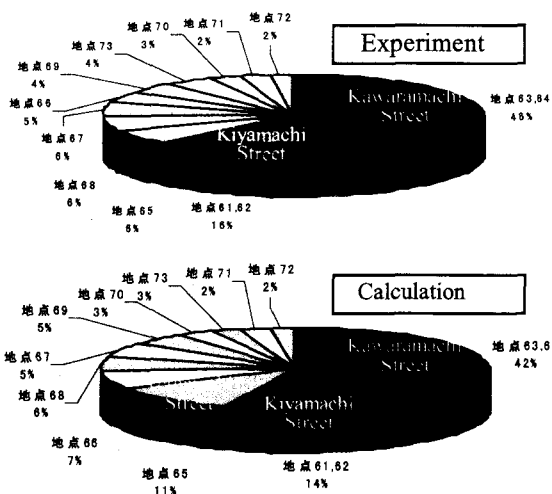


図-12 街路からの流出量に関する比較（地下浸水無）

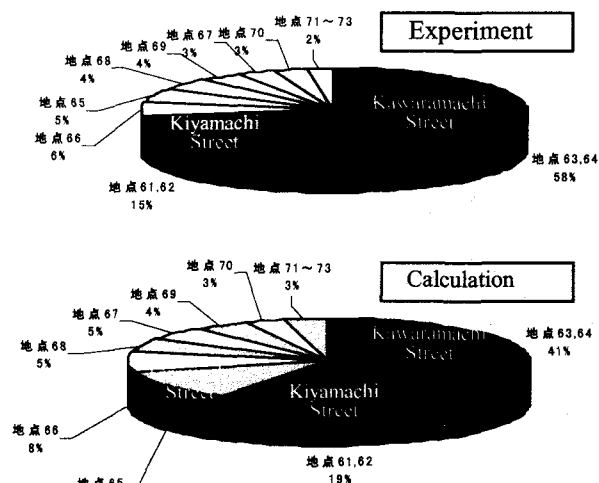


図-13 街路からの流出量に関する比較（地下浸水有）

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図-13に示す。街路から流出した氾濫水の総量は実験では 0.89m^3 , 計算では 0.98m^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。その原因は図-14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 0.3m^3 であるのに対し, 計算では 0.14m^3 と実験値の半以下となっており, また御池地下へも実験では 0.58m^3 であるのに対し, 計算では 0.44m^3 と違いが生じていることから, 地下への浸水を段落ち流れの流入条件ではうまく表せていないこと等によると考えられる。また, 実験では地下空間への浸水量が全氾濫水量の約1/2となっており, 地上部での住区への浸水を考慮していないものの, 大量の水が地下空間へ侵入することが分かり, 地下浸水対策の重要性がわかる。

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。今後, 地下への流入量の評価法を詳細に検討するとともに, 住区の浸水を考慮した実験ならびにシミュレーション手法の開発を行う予定である。

謝 辞

本研究を実施するに当たり, 文部科学省の振興調整費（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, 研究代表：河田恵昭 京都大学教授）の補助を得た。ここに関係各位に深謝の意を表する。

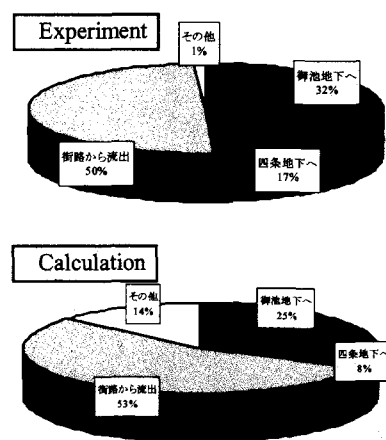


図-14 氾濫水の流出先

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, 京大防災研年報, 第33号B-2, 1990, pp. 427-442.

(2003. 9. 30 受付)