

市街地氾濫模型実験

辰己賢一・多河英雄・吉田義則・三浦勉・松浦秀起

要 旨

本報は、京都市市街地を対象に、鴨川氾濫時の地上部における氾濫水の挙動を水理模型実験と数値計算手法を用いて調べ、考察したものである。実験は、実現象により近い縮尺1/100の市街地地上模型を用いて行い、数値計算は平面2次元非圧縮流れの基礎式を差分化し、SIMPLE法による計算を行った。その結果、氾濫水の拡がり方を把握することができ、洪水弱地域が明らかとなった。

キーワード: 模型実験, 京都市, 鴨川, 洪水氾濫, 数値解析

1. はじめに

豪雨はときに甚大な洪水災害を引き起こす。歴史をたどると1935年6月、豪雨により鴨川は氾濫し、三条・四条両大橋など40ヶ所以上の橋が決壊・流出し、多くの人命が失われた。その後、河川の改修が進み、河川氾濫などはおこっていない。しかし、近年の異常気象や都市化の進行は、都市域の流出形態を大きく変化させており、地上での氾濫だけでなく地下空間へ氾濫水が流入することが予想され、甚大な水害の発生が予想される。

地上・地下空間における氾濫水の挙動を定量的・定性的に知ることは防災面から重要であり、このような氾濫水の挙動を予測する手法として、水理模型実験、数値計算などがある。市街地の特徴である複雑に入り組んだ道路網を流れる氾濫水の挙動を正確に把握するには、市街地を詳細に表現した模型を使って実験を行わなければならない。また、過去の氾濫実績との比較や、数値計算と水理模型実験を併用することで、検証の精度を高めることができる。

本報は、防災および水災害の立場から鴨川が氾濫した場合の想定される物的被害、人的被害の及ぶ危険区域、地上浸水深、地下空間へ流れ込む氾濫水の流量の検証を行い、都市域の氾濫現象を時間的・空間的に考察するものである。実験は、実現象により近い縮尺1/100の市街地地上模型により行うものである。数値計算は2次元非圧縮性流れの基礎方程式を離散化し、SIMPLE

法による計算を行った。

水理模型実験の手順をフローチャートで示したものを Fig.1 に示す。

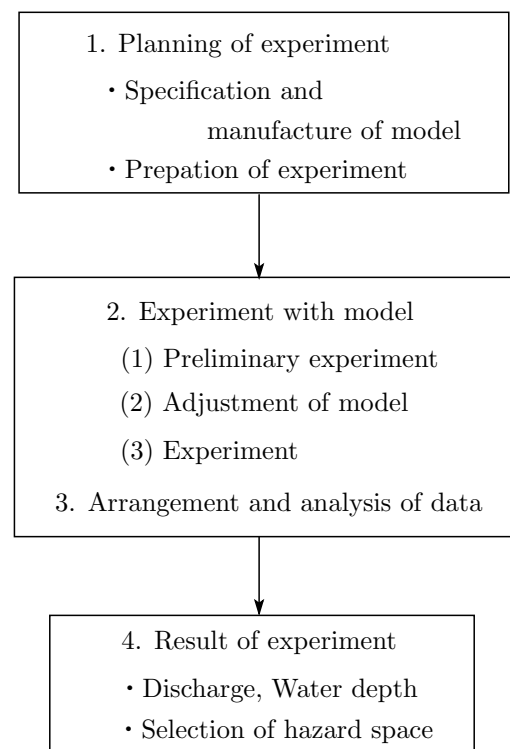


Fig. 1: Flow diagram of experiment

2. 水理模型実験計画

2.1 水理相似則にもとづく模型縮尺

本実験で対象としている流れは、固定床の開水路流れであり、重力が卓越する流れであることより、相似則にはフルードの相似則を用いる。なお、本模型実験では、流れが複雑に合流し、3次元的であるため、無歪み模型とする。このような流れの場合、フルードの相似則より導かれる水理量の関係式は、幾何縮尺を L_r とすると、Table.1 のように表される。

Table. 1: Relation of prototype and model

Model scale	Prototype	Model
$L_r = 1/100$	1000 (m)	10 (m)
$V_r = L_r^{1/2}$	100 (m/s)	10 (m/s)
$A_r = L_r^2$	100 (m ²)	0.01 (m ²)
$Q_r = L_r^{5/2}$	100 (m ³ /s)	0.001 (m ³ /s)
$t_r = L_r^{1/2}$	100 (s)	10 (s)

L_r : Length scale, V_r : Velocity scale, A_r : Area scale, Q_r : Discharge scale, t_r : Time scale

2.2 実験装置および実験方法

豪雨による鴨川流域氾濫によって氾濫流がどのような挙動を示し、京都市市街地がいかに危険な状況になり得るかを実験により確かめ、数値計算と比較を行うために地上浸水深、地下街への氾濫水の流入量測定、および流れ場の可視化実験を行った。Fig.2 に京都市市街地を対象とした地上模型平面図を示す。Fig.3 に地上模型全体写真を示す。模型の大きさは、東西方向に 10m、南北方向に 20m で、東西方向に鴨川左岸から烏丸通、南北方向に二条通から高辻通までの領域を網羅している。また、模型は道路と建造物で構成されており、建造物は非浸水性を仮定し、氾濫水が流入しない設定となっている。なお、京都市の地盤形状に合わせ、模型は御池通以南で南に 1/200 の傾斜が設けられている。

実験は氾濫による地上部への氾濫水量を $0.001\text{m}^3/\text{s}$ (実物換算で $100\text{m}^3/\text{s}$) に設定し、1935 年に起こった氾濫箇所に近い御池大橋付近の氾濫点 (Fig.2) から 30 分間 (実物換算で 300 分間) 氾濫水をあふれださせ、サーボ式水位計、容量式水位計、超音波水位計、三角堰、バケツ、コンテナを使って、地下街および下流端に流れ込む流量、地上浸水深の計測を行った。計測時間は、氾濫後の氾濫水の挙動を考慮にいれ、45 分間 (実物換算で 450 分間) 行った。なお、流量計測は Fig.2 に数字で示されている合計 57 地点で行い、地上浸水深の計測は Fig.2 に示す a,b,c,d,e,f,g,h の計 8 点で行った。

模型に流れ込む流入量の設定には、流量自動制御シ

ステムを用いた。このシステムは、パソコン、送流ポンプ、インバータ、電磁流量計から構成され、電磁流量計の検出をインバータを介してポンプの回転数をフィードバック制御することにより、与えたいハイドログラフを精度良く供給するシステムである。なお、水温の調節をすることはできない。

流れの状態はブルーのポスターカラーを使っての可視化によって調べた。可視化流れを鮮明にみせるため、可視化剤であるポスターカラーの注入には最新の注意を払った。具体的にはポスターカラーをあらかじめ熱湯を入れたバケツにいれ、十分に可視化できる非常に濃い溶液を作り、ピーカーに入れた溶液をゆっくりと氾濫点手前付近に注入した。また、実験施設天井にはアングルが組み立てられており、デジタルビデオカメラを複数台固定し、上方、斜め上方から録画撮影を行った。撮影したデジタルビデオデータを静止画像に変換し、氾濫開始後の連続写真を作成した。



Fig. 2: Ground-surface model and measurement points

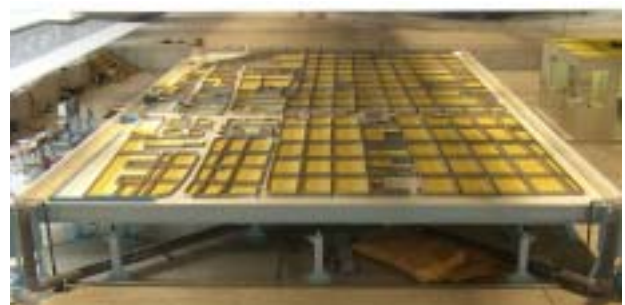


Fig. 3: Ground-surface model of Kyoto.

2.3 実験手順

(1) 流量制御

1. 各装置の電源投入の準備をし、電源を投入する。
2. 計算機を起動させ、流量自動制御プログラムを起動する。
3. 運転条件およびハイドログラフの設定を行う。
4. 自動制御運転を開始し、水を流入させる。

(2) 流量測定

1. 地上部から地下部へと通ずる地点（地点番号 1-59）には、直径 2cm ほどの穴と囲いが設けてあり、穴を通して氾濫水が地下部へと流れ落ちる。この穴に模型下部からホースを接続する。
2. 地下部に流れ込む流量値によって、ホース受け口に設置するバケツ、コンテナのサイズを振り分け、サーボ式水位計、容量式水位計のいずれかを固定する（Fig.4, Fig.5, Fig.7）。下流端（地点番号 61-73）の流出口には三角堰（Fig.6）を置き、サーボ式水位計を設置する。なお、バケツには水位計を設置せず、実験終了後、量りによってバケツに溜まった水の重量を計測する。
2. コンテナ、三角堰に流入した氾濫水による水位変化から得られた電圧値の時系列（0.2s のサンプリング間隔）をデータ収集システム NR-1000（キーエンス社製）に保存する。
3. NR-1000 に取り込まれたデータを USB 接続で計算機に転送し、ハードディスクに保存する。
4. 保存された電圧データを水位計の校正結果、コンテナの容積より流量値に換算する。

(3) 動画撮影

1. 実験室天井に固定したデジタルビデオカメラの電源を入れる（上方 9 台、斜め上方 2 台）。
2. ポスターカラーで水を着色する。
3. 模型に水を流入させる。
4. 水が広がっていく様子をデジタルビデオカメラで撮影する。

2.4 実験ケース

実験には、流量測定、水深測定、可視化による流況撮影のそれぞれに対し、地下流入のあり・なしの 2 ケース、初期の路面状態（市街地、河川を含む）が乾いた状態と湿った状態の 2 ケースの計 4 ケースを設定し、氾濫水の挙動を観測した。地下流入ありは、氾濫水が歩行者用地下通路（階段を含む）、地下駐車場入口を通過して地下街へと流れ落ちるケースを想定したものである。地下流入なしは、地下流入させる穴をふさぎ、地下の貯水能力がないケースを想定したものである。



Fig. 4: Capacity type water gauge



Fig. 5: Servo type water gauge

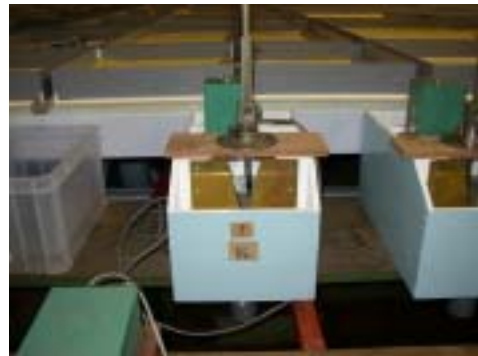


Fig. 6: Triangular weir



Fig. 7: Experimental setup

3. 数値計算法

3.1 基礎方程式

数値計算は、地下街への氾濫水の流入を考慮しない2次元平面モデルであり、SIMPLE法を用いた。SIMPLE法は、有限体積法を Navier-Stokes 方程式に適用し、得られた離散方程式を連立させて解く解法アルゴリズムである。陰解法であるため、安定限界がなく保存性が保たれることが知られている。

2次元平面モデルで扱う2次元非圧縮性流体を記述すると、質量保存式は、

$$\text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

で表される。

ここで、 ρ : 流体密度、 $\mathbf{u}=(u_x, u_y)$: 速度ベクトルである。

Newton の運動量保存則より、 x, y 方向の運動量保存式は、式 (2)、式 (3) で記述することができる。

$$\frac{\partial \rho u_x}{\partial t} + \text{div}(\rho u_x \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u_x) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u_y}{\partial t} + \text{div}(\rho u_y \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} u_y) \quad (3)$$

ここで、 p : 圧力、 μ : 粘性係数、 ρ : 密度、 u_x : 流速の x 成分、 u_y : 流速の y 成分である。

上記の非圧縮粘性流れの基礎式を離散化し、離散方程式を導くため、Fig.8 に示す格子状で2次元直方格子への物理量の配置を定義する。これに際して圧力、密度、動粘性係数のスカラー量はセル中心に定義し、速度成分はセル頂点の中心にくるようにずらした交互配置格子 (スタッガードメッシュ) を採用する。なお、計算領域の境界は太線で示し、南北方向に y 軸、東西方向に x 軸をとった。

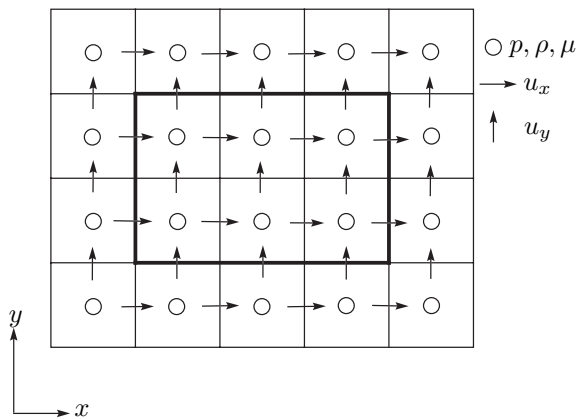


Fig. 8: Physical quantity arrangement

3.2 離散化

数値計算においては微分を風上差分で近似し、微分方程式を代数方程式で近似する。Fig.9 に示される計算領域において $OABC$ を x, y 方向に有限間隔 $\Delta x, \Delta y$ の間隔格子に分割する。時間微分は Δt の差分間隔で近似する。差分間隔 Δt については $\Delta t = 0.00001$ を採用した。空間差分間隔 $\Delta x, \Delta y$ については $\Delta x = \Delta y = 0.01\text{m}$ を用いた。境界条件は、境界面上での流速をゼロとし、すべりなしとした。初期条件は QB での速度成分を y 方向に -2m/s とする。密度 $\rho = 997.1\text{kg/m}^3$ 、粘性係数 $\mu = 0.000891\text{Pa}\cdot\text{s}$ とする。

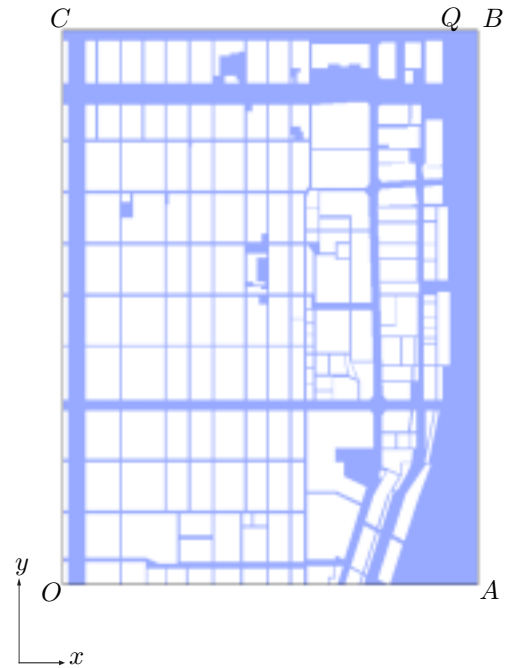


Fig. 9: Region of calculation

スタッガードメッシュと各変数の定義点を Fig.10 に示す。

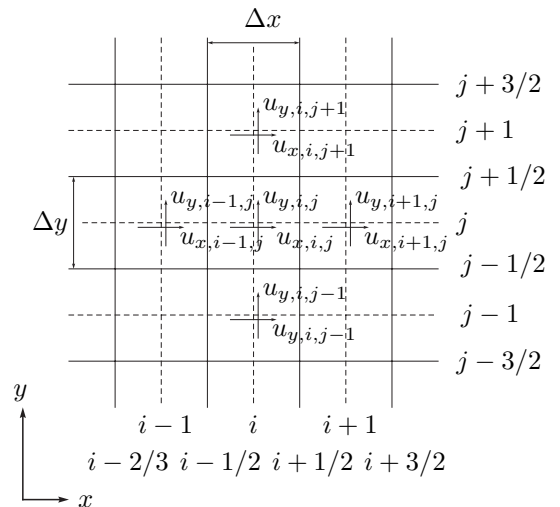


Fig. 10: Calculation mesh (staggered mesh)

Fig.10 のスタッガードメッシュに対し，コントロールボリュームについて， x 方向の運動量保存式を積分すると，

$$\int_{CV} \frac{\partial \rho u_x}{\partial t} dx dy + \int_S (\rho u \mathbf{n}) dS = \int_{CV} -\frac{\partial p}{\partial x} dx dy + \int_S (\mu \text{grad } u_x) \mathbf{n} dS \quad (4)$$

を得る。式 (4) を差分化すると式 (5) が得られる。

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{(\rho u_x)_{i+1/2,j}^{n+1} - (\rho u_x)_{i+1/2,j}^n}{\Delta t} \right\} \Delta x \Delta y \\ & + \{ (\rho u_x u_x)_{i+1,j}^{n+1} - (\rho u_x u_x)_{i,j}^{n+1} \} \Delta y \\ & + \left\{ (\rho u_x u_y)_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} - (\rho u_x u_y)_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} \right\} \Delta x \\ & = -(p_{i+1,j}^{n+1} - p_{i,j}^{n+1}) \Delta y + \mu \left\{ \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} \right. \\ & \quad \left. - \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} \right\} \Delta x \end{aligned} \quad (5)$$

ここに，上添字 n は時間ステップを，下添字は空間メッシュ位置番号を表す。

式 (5) に SIMPLE 法を適用すると式 (6) が得られる。

$$\begin{aligned} & \rho_{i+1/2,j}^{n+1} (u_{x,i+1/2,j}^{n+1} - u_{x,i+1/2,j}^n) \Delta x \Delta y / \Delta t \\ & + u_x^n \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{i+1/2,j}^{n+1} \Delta x \Delta y \\ & + \left[\max(\rho_{i+1}^{n+1} (u_{x,i+1/2,j}^{n+1} + u_{x,i+3/2,j}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{x,i+1/2,j}^{n+1} \right. \\ & - \max(-\rho_{i+1}^{n+1} (u_{x,i+1/2,j}^{n+1} + u_{x,i+3/2,j}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{x,i+3/2,j}^{n+1} \} \\ & - \{ \max(\rho_{i,j}^{n+1} (u_{x,i-1/2,j}^{n+1} + u_{x,i+1/2,j}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{x,i-1/2,j}^{n+1} \\ & - \max(\rho_{i,j}^{n+1} (u_{x,i-1/2,j}^{n+1} + u_{x,i+1/2,j}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{x,i+1/2,j}^{n+1} \} \Delta y \\ & + \left[\max((\rho_{i+1,j+1/2}^{n+1} u_{y,i+1,j+1/2}^{n+1} \right. \\ & \quad \left. + \rho_{i,j+1/2}^{n+1} u_{y,i,j+1/2}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{x,i+1/2,j}^{n+1} \right. \\ & - \max(-(\rho_{i+1,j+1/2}^{n+1} u_{y,i+1,j+1/2}^{n+1} \\ & \quad \left. + \rho_{i,j+1/2}^{n+1} u_{y,i,j+1/2}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{x,i+1/2,j+1}^{n+1} \} \\ & - \{ \max((\rho_{i,j-1/2}^{n+1} u_{y,i,j-1/2}^{n+1} \\ & \quad \left. + \rho_{i+1,j-1/2}^{n+1} u_{y,i+1,j-1/2}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{x,i+1/2,j-1}^{n+1} \right. \\ & - \max(-(\rho_{i,j-1/2}^{n+1} u_{y,i,j-1/2}^{n+1} \\ & \quad \left. + \rho_{i+1,j-1/2}^{n+1} u_{y,i+1,j-1/2}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{x,i+1/2,j}^{n+1} \} \Delta x \\ & = -(p_{i+1,j}^{n+1} - p_{i,j}^{n+1}) \Delta y + \mu \left[\frac{1}{\Delta x} \{ (u_{x,i+3/2,j}^{n+1} - u_{x,i+1/2,j}^{n+1}) \right. \right. \\ & \quad \left. - (u_{x,i+1/2,j}^{n+1} - u_{x,i-1/2,j}^{n+1}) \} \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{\Delta y} \{ (u_{x,i+1/2,j+1}^{n+1} - u_{x,i+1/2,j}^{n+1}) \right. \\ & \quad \left. - (u_{x,i+1/2,j}^{n+1} - u_{x,i+1/2,j-1}^{n+1}) \} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

同様な方法で y 方向の運動方程式を積分して離散化すると式 (7) が得られる。

$$\begin{aligned} & \rho_{i,j+1/2}^{n+1} (u_{y,i,j+1/2}^{n+1} - u_{y,i,j+1/2}^n) \Delta x \Delta y / \Delta t \\ & + u_y^n \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{i,j+1/2}^{n+1} \Delta x \Delta y \\ & + \left[\max(\rho_{i+1}^{n+1} (u_{y,i,j+1/2}^{n+1} + u_{y,i,j+3/2}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{y,i,j+1/2}^{n+1} \right. \\ & - \max(-\rho_{i+1}^{n+1} (u_{y,i,j+1/2}^{n+1} + u_{y,i,j+3/2}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{y,i,j+3/2}^{n+1} \} \\ & - \{ \max(\rho_{i,j}^{n+1} (u_{y,i,j-1/2}^{n+1} + u_{y,i,j+3/2}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{y,i,j-1/2}^{n+1} \\ & \quad - \max(-\rho_{i,j}^{n+1} (u_{y,i,j-1/2}^{n+1} \\ & \quad \left. + u_{y,i,j+1/2}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{y,i,j+1/2}^{n+1} \} \Delta x \\ & + \left[\max(\rho_{i+1/2,j+1}^{n+1} u_{x,i+1/2,j+1}^{n+1} \right. \\ & \quad \left. + \rho_{i+1/2,j}^{n+1} u_{x,i+1/2,j}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{y,i+1/2,j+1/2}^{n+1} \right. \\ & - \max(-(\rho_{i+1/2,j+1}^{n+1} u_{x,i+1/2,j+1}^{n+1} \\ & \quad \left. + \rho_{i+1/2,j}^{n+1} u_{x,i+1/2,j}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{y,i,j+1/2}^{n+1} \} \\ & - \{ \max((\rho_{i-1/2,j}^{n+1} u_{x,i-1/2,j}^{n+1} \\ & \quad \left. + \rho_{i-1/2,j+1}^{n+1} u_{x,i-1/2,j+1}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{y,i-1,j+1/2}^{n+1} \right. \\ & - \max(-(\rho_{i-1/2,j}^{n+1} u_{x,i-1/2,j}^{n+1} \\ & \quad \left. + \rho_{i-1/2,j+1}^{n+1} u_{x,i-1/2,j+1}^{n+1}) / 2, 0) \cdot u_{y,i,j+1/2}^{n+1} \} \Delta y \\ & = -(p_{i,j+1}^{n+1} - p_{i,j}^{n+1}) \Delta y + \mu \left[\frac{1}{\Delta x} \{ (u_{y,i,j+3/2}^{n+1} - u_{y,i,j+1/2}^{n+1}) \right. \right. \\ & \quad \left. - (u_{y,i,j+1/2}^{n+1} - u_{y,i,j+1/2}^{n+1}) \} \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{\Delta y} \{ (u_{y,i+1,j+1/2}^{n+1} - u_{y,i,j+1/2}^{n+1}) \right. \\ & \quad \left. - (u_{y,i,j+1/2}^{n+1} - u_{y,i-1,j+1/2}^{n+1}) \} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

連続式を積分して得られる離散式は式 (8) のように表すことができる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{i,j}^{n+1} \Delta x \Delta y + [(\rho u)_{x,i+1/2,j}^{n+1} - (\rho u)_{x,i-1/2,j}^{n+1}] \Delta y \\ & + [(\rho u)_{y,i,j+1/2}^{n+1} - (\rho u)_{y,i,j-1/2}^{n+1}] \Delta x = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式 (6),(7),(8) を u_x, u_y, p について反復法によって解く。圧力補正式を解いて得られた圧力補正量を用いて補正を行うと，解が発散することが知られており，これを回避するため，不足緩和を用いた。不足緩和係数は 0.6 を採用した。収束条件として時間発展方程式の反復計算中のある計算ステップでの速度値，圧力値と一つ前の計算ステップでの速度値，圧力値の差を全ての格子点上で求め，その差の最大値が 10^{-8} 以下となったとき解は収束したと判断した。

4. 実験結果

Fig.11 に氾濫水の到達分布を示す。Fig.12(a)(b)(c)(d) に主要 8 地点における地下街への積算流入量の時間変化を示す。Fig.12(e)(f)(g)(h) に地上浸水深の時間変化を示す。Fig.13 に氾濫開始 3 分後、10 分後、20 分後における氾濫水分布の実験結果と数値解析結果（速度ベクトル図）を示す。Fig.14 に地下への氾濫水流入があるケースにおける氾濫開始後 0 分後、20 分後、30 分後、60 分後、70 分後、90 分後の氾濫水分布図を示す。Fig.15 に地下への氾濫水流入がないケースにおける氾濫開始 10 分後、20 分後、30 分後、60 分後、70 分後、90 分後の氾濫水分布図を示す。Table.4 に下流端への氾濫水の到達時間を示す。Table.5 に地上浸水深の平均値を示す。

Fig および Table のラベルに表示されているコードは、路面の初期状態（dry, wet）、地下流入のありなし（u:あり, s:なし）である。なお、図表に記載されているすべてのデータは、実物換算値である。

4.1 地下街への流入について

Fig.14, Fig.15 より御池大橋で鴨川が氾濫した場合、京都市役所以北への氾濫水の流入はほとんどないことが予想される。京都市は御池通以南において南北方向の勾配が大きく、南に行くにしたがって、地盤が低くなっていることが原因であると考えられる。また、御池通地下駐車場東口に流れ込む水量は、氾濫総流量（ 180000m^3 ）の約 16%（ $26000 \sim 28000\text{m}^3$ ）を占めており、単位時間あたりの流入量は、定常状態時で $15\text{m}^3/\text{s}$ となることがわかった。また、御池通の歩行者用地下通路には、定常状態において $2\sim 3\text{m}^3/\text{s}$ の流入量で地下空間へ氾濫水が浸入する結果となった。このようなことから、十分な洪水対策を施していないと御池通地下駐車場、御池通歩行者用地下通路は壊滅的な打撃を受けると考えられる。一方、氾濫総流量の約 34% が御池通の地下空間に流入し、約 17% が四条通の地下空間に流入し、約 50% が地下街に流れ込まず、下流端（地点 61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73）に到達する結果となり、地点番号 61,62 にはおよそ 17 分弱で氾濫水が到達する実験結果となった（Fig.11, Table.4）。

Fig.12(a)(b)(c)(d) より、地下街への氾濫水の流入が起らないケース、つまり、地下街の貯水能力がなくなったとき、貯水能力を十分に有する場合と比較して、下流端に流れ込む流量は、河原町通で 1.5 倍、木屋町通で 2 倍になることが予想される。このことから、地上部への水の流入時間が長いほど、より物的・人的被害が広がることが考えられる。

Table.4 より、地下街への氾濫水の流入が起らない場合は、流入がある実験ケースと比較し、地点番号 61,62 を除いて氾濫水の下流端への到達時間が短くなっ

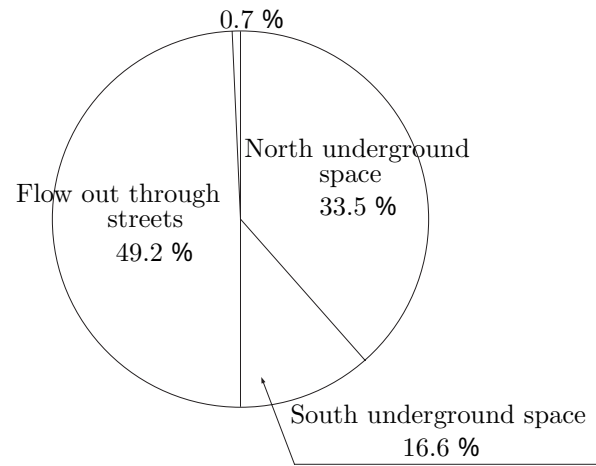


Fig. 11: Distribution of volume of inundation

Table. 4 : Results of attainment time at down-stream end

point	dry-u	wet-u	dry-s	wet-s
61,62	1060	1230	1270	1230
63,64	1150	1170	1050	1130
65	2240	2090	1950	1760
66	2320	2170	2050	1850
67	3160	3050	2400	2160
68	3330	3160	2590	2200
69	4920	4290	2760	2600
70	4900	4370	2940	2690
71	5490	4740	3140	2700
72			3400	2840
73	6950	5440	3230	3090

units: second. blank shows that flow did not reach.

ていることがわかる。特に、地下街への氾濫水の流入があるときには到達しなかった地点番号 72 に氾濫水が到達することがわかる。また、氾濫点からの距離が遠いほど、地下流入のありなしによる到達時間のタイムラグが大きくなっていることがわかる。これは、氾濫点に近いほど流量が多く、流速が大きいため、地下空間への氾濫水の流入が地上部の流れの遷移に影響を与えにくいことが原因であると考えられる。

流れの遷移が初期路面状態に依存しないことが原因であると考えられる。

4.2 地上浸水深について

Fig.12(e)(f)(g)(h) より、いずれの地点でも、氾濫水が到達すると水深が急激に上昇しており、氾濫点に最も近い御池通地下駐車場東口付近（地点番号 a）の地上浸水深の値の乱れが目立つ。これは、氾濫点に近い

ことにより、流れが不安定となっていることや、超音波水位計の測定誤差が原因であると考えられる。また、全計測地点で定常時の地上浸水深は 0.2m を超えており、浸水現象が顕著に現れることが予想される。特に、木屋町通を氾濫点より少し南に下った地点番号 b では、いずれの実験ケースにおいても定常時における地上浸水深が 1m 前後となり、四条河原町（地点番号 h）での浸水深は定常時で最大 0.86m となっている（Table.5）。この地点の周辺には、地下鉄や地下街、商業地が密集しており、地上・地下に多大な被害をもたらすことが予想される。

井上ら（2003）は、京都御池地下街の模型実験により、浸水時の避難経路となる階段部での流速と水深を流入流量を変化させて測定し、地上浸水深が 0.3m を超えると、避難が困難になりそうであるとの結果を得ている。本実験の結果より、地点 a,b,c,d,e,f,h の地上浸水深は 0.3m を超えていることから、この地点の浸水時の避難経路となる階段部での歩行は困難になることが予想される。

Table. 5 : Average of inundation water depth

point	dry-u	wet-u	dry-s	wet-s
a	0.67	0.66	1.03	1.07
b	0.97	0.97	1.15	1.17
c	0.55	0.54	0.74	0.74
d	0.49	0.50	0.66	0.67
e	0.46	0.47	0.66	0.68
f	0.58	0.59	0.72	0.73
g	0.24	0.24	0.43	0.45
h	0.53	0.55	0.85	0.86

units: meter. average of 9000-12000s.

4.3 可視化結果について

Fig.13 に示す氾濫開始後 3 分後の可視化画像を見ると、氾濫水は木屋町通に到達していることがわかるが、御池通にはほとんど氾濫水が流入していない。10 分後には、氾濫水は河原町三条、木屋町三条を抜け下流端方向に進んでいることがわかる。さらに 20 分後には、氾濫水は四条通を過ぎて、下流端に到達していることがわかる。Fig.14, Fig.15 に示す 60 分後以降の可視化結果を見ると、氾濫水の分布域はほとんど変化しておらず、氾濫水の流れは定常状態となっている可能性が高い。

地下流入ありとなしの実験ケースの可視化結果から、同時刻と比較すると、地下に水がこれ以上入り込まないことを前提としている分、地下流入がないケースのほうがより広域にわたって氾濫水が到達していることがわかる。また、地下流入ありのケースでは、御池通地下駐車場西口（地点番号 14,29）に氾濫水は到達し

なかったが、地下流入なしのケースでは到達していることがわかる。

4.4 数値モデルについて

Fig.13 に示す実験結果と数値解析結果からわかるように、数値計算では、御池通以北に氾濫水が到達し、また、実験結果と比較して御池通西側に氾濫水が到達していることがわかる。これは、実験模型は御池通以南で地盤が低い南側に傾斜しており氾濫水が下流端に向かって流下しているのに対し、数値モデルは 2 次元平面モデルであり、運動量保存式の体積力の項を無視し、浮力を考慮にいれていないことが原因であると考えられる。また、境界条件、計算条件、物性値の取り扱いに問題があるかもしれない。今後の取り組むべき課題として、数値計算で得られたデータについて詳細に解析することが挙げられる。

4.5 テクニカルノート

本実験は、企画段階から含めて約 200 日を費やした大規模プロジェクトであった。サーボ式水位計、容量式水位計、超音波式水位計はそれぞれ 1 台ずつ特性が異なり、測定に耐えうる水位範囲の検証や校正作業を行わなければならなかった。また、氾濫水がどの地点にどのくらい流入するのかを事前に調べておかなければ、コンテナ、バケツ、水位計の測定地点への振り分け作業ができないことから、予備実験の実施を入念におこなった。

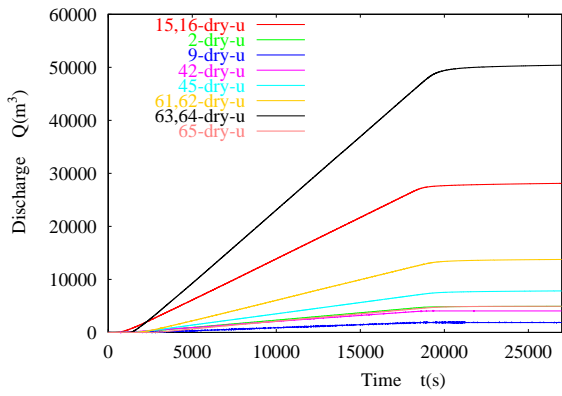
実験所内は季節変動による温度変化が激しく、それは水温にもあてはまる。長期間にわたる実験であったことから、動粘性係数の変化に伴い、氾濫水の挙動が変化する可能性も考えられたため、できるだけ短期間で実験を行う必要があったのではないかと考える。

可視化実験の際のデジタルビデオカメラの設置作業は、実験所天井で行った。それには危険が伴い、細心の注意が必要であった。また、デジタルビデオカメラでとらえている撮影範囲は適当かどうか、流れの状態を把握するのに十分な性能を有しているかなど、装置を固定するための実験器具の作成を含め、高い技術力が要求された。

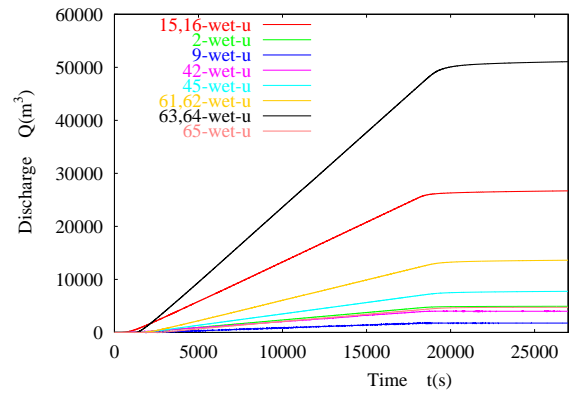
5. おわりに

模型実験、数値解析モデルを用いて、京都市市街地域の氾濫水挙動を調べた。その結果として京都市市街地における氾濫水の挙動、洪水弱地域を明らかにすることができた。本研究より得られた知見を以下に示す。

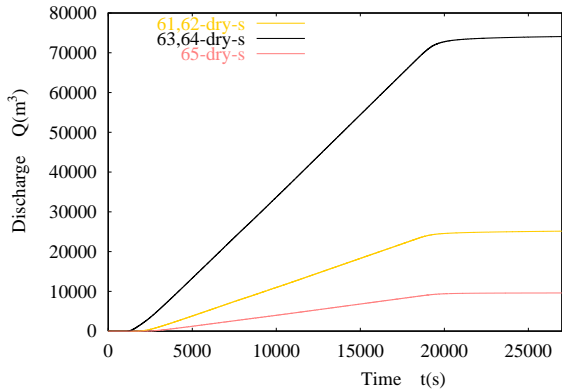
- (1) 御池の地下駐車場東口に流れ込む流量は最大で 27000m^3 前後となり、地下流入なしの実験ケース



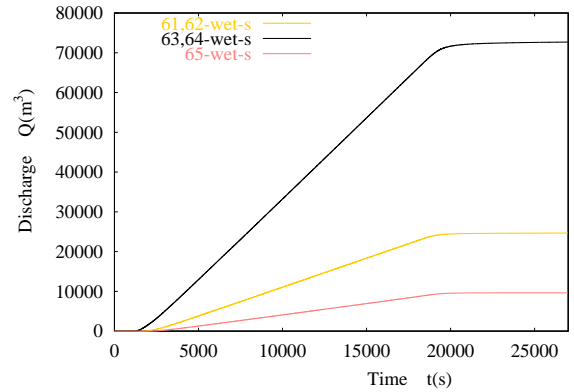
(a) Drop case , dry bed condition



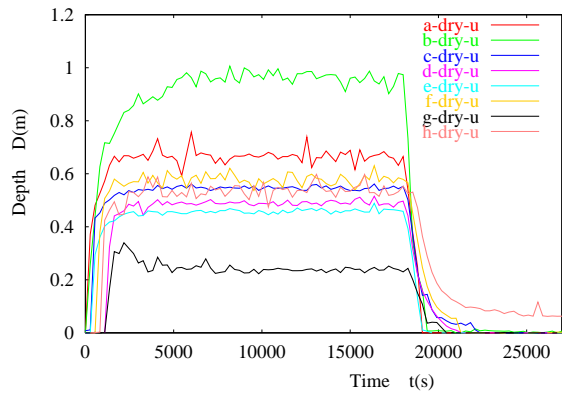
(b) Drop case , wet bed condition



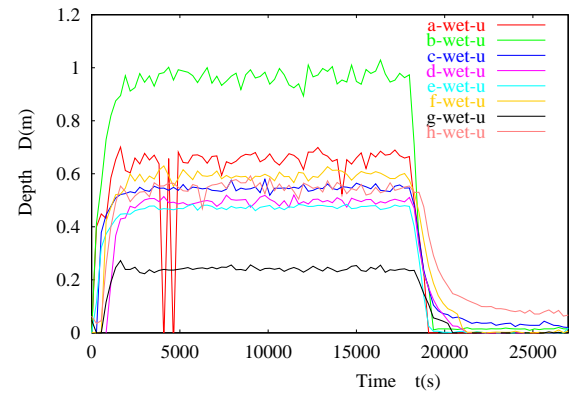
(c) Non drop case , dry bed condition



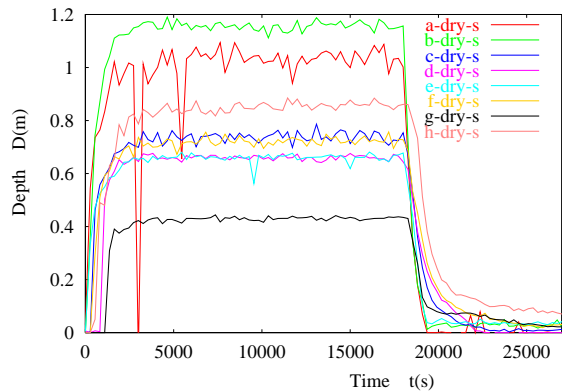
(d) Non drop case , wet bed condition



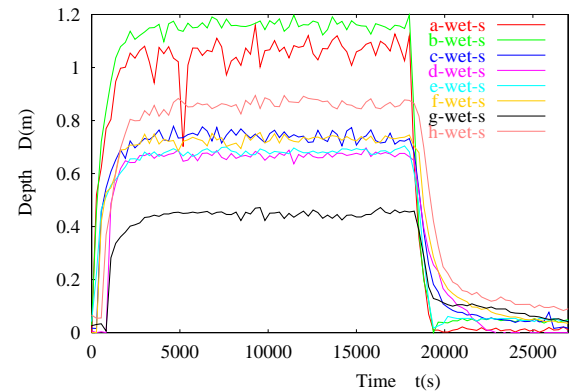
(e) Drop case , dry bed condition



(f) Drop case , wet bed condition



(g) Non drop case , dry bed condition



(h) Non drop case , wet bed condition

Fig. 12: Temporal change of discharge and water depth



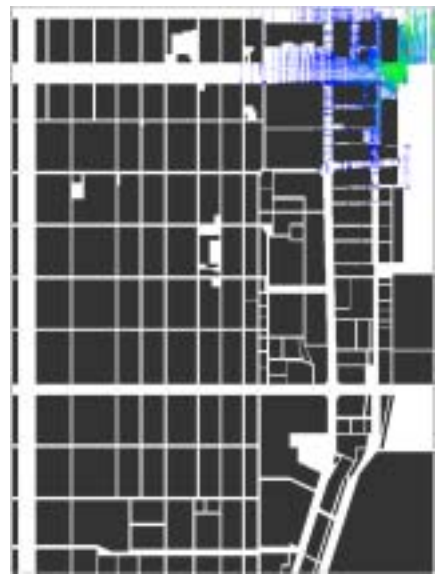
(a) After 3 minutes



(b) After 3 minutes



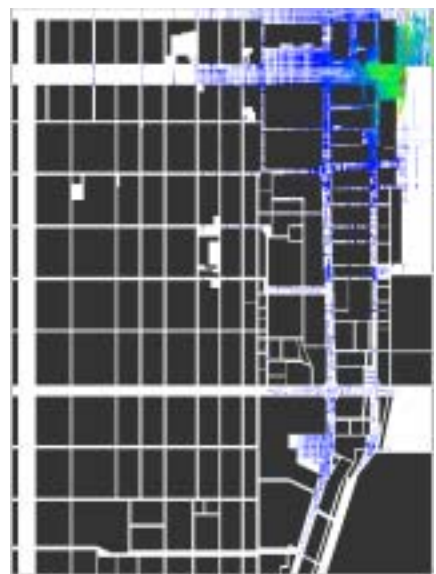
(c) After 10 minutes



(d) After 10 minutes



(e) After 20 minutes



(f) After 20 minutes

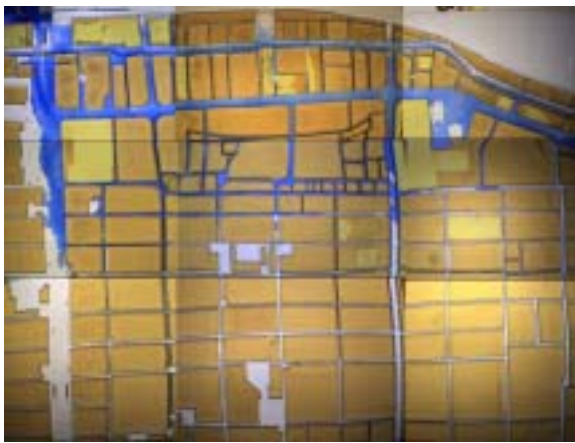
Fig. 13: Comparison of inundation flow distribution (left: experiment , right: simulation)



(a) After 10 minutes



(b) After 20 minutes



(c) After 30 minutes



(d) After 60 minutes



(e) After 70 minutes

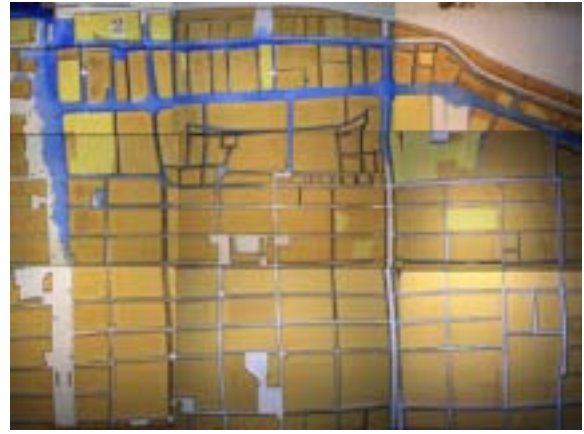


(f) After 90 minutes

Fig. 14: Temporal change of inundation flow distribution (drop case , wet bed condition)



(a) After 10 minutes



(b) After 20 minutes



(c) After 30 minutes



(d) After 60 minutes



(e) After 70 minutes



(f) After 90 minutes

Fig. 15: Temporal change of innudation flow distribution (non drop case , wet bed condition)

で水深が約 1m, 地下流入ありの実験ケースで約 0.65m に達し, 大被害が生じる可能性が予想された。

- (2) 氾濫水が下流端に到達する時間は, 最短で氾濫開始後 1200s 前後である。
- (3) 御池通以北では, 地盤特性から氾濫水が流入しない可能性がある。
- (4) 氾濫水は, 木屋町通より河原町通に早く伝播する。
- (5) 実験結果と数値計算結果では, 厳密な一致は見られなかったが, 氾濫水の到達場所は比較的一致した結果が得られた。
- (6) 構造物周辺など局所的な水位変化, 水面の乱れを定量的に測定することができなかった。
- (7) 氾濫水の流速測定を実施し, 氾濫時に歩行が困難になる地域を選定する必要がある。

謝辞

本論文は, 科学技術振興調整費による市街地洪水模型実験プロジェクト(代表者井上和也教授)に参加した背景を基本とし, 得られたデータは中川一教授, 石垣泰輔助教授, 戸田圭一助教授のご協力の基で使わせ

ていただいた。また, この実験に携わった技術室のメンバー及び研究支援推進員の北川吉男氏に記して感謝します。

参考文献

- 標 宣男・鈴木正昭・石黒美佐子・寺坂晴夫(1994): 数値流体力学, 朝倉書店, pp.105-184.
- 荒川忠一(1994): 数値流体工学, 東京大学出版会, pp.96-139.
- 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.
- 戸田圭一・井上和也・谷野知伸・前田 修(1998): 地下街の氾濫浸水解析, 京都大学防災研究所年報, 第 41 号 B-2, pp.313-323.
- Patankar, S.V. and Spalding, D.B.(1972): Int'l j. heat mass transfer, Vol.15, pp.1787-1806.
- Ishigaki, T., Inoue, K. and Toda, K.: Hydraulic model tests of inundation in urban area with underground space, Proceedings of XXX IAHR Congress, 2003 (in printing).

Experiment of overland flood flow in urban area

Kenichi TATSUMI, Hideo TAGAWA, Yoshinori YOSHIDA, Tsutomu MIURA,
Hideki MATSUURA

Synopsis

Using the experiment model and numerical model has been investigated and considered inundation process in Kyoto. The experiment was conducted using the ground-surface model of scales 1/100. 2-D averaged numerical model was used to calculate the velocity distributions, and the solutions follow an iterative procedure based on the SIMPLE scheme. Consequently, we could express inundation flow behavior in underground space and flow hazard space from the hydraulic and disaster preventive aspects.

Keywords: model experiment, kyoto, kamo river, flood, numerical simulation