第 II 部門　　境界埋め込み法を用いた 2 次元浅水流 FDS モデルの氾濫模型実験への適用

神戸大学大学院自然科学研究科　学生員　○大薗　政志
神戸大学大学院自然科学研究科　学生員　　中村　有加里
神戸大学工学部　　　　　　　　正会員　　藤田　一郎

## 1. はじめに

近年多くの地域で洪水氾濫が頻発しており，被害を軽減するために氾濫危険区域における家屋や道路等が密集する都市域での氾濫流挙動の的確な把握が重要になっている．氾濫流の挙動を解析するために数多くの計算モデルが提案されてきたが，それぞれのモデルに一長一短があるのが現状のようである．他方，氾濫解析においてもっとも重要となるのが対象とする地域の地形データの入手である．最近では，解析に必要な国土数値情報や統計データが直交座標系で整備されていることから，直交格子を用いた計算モデルではこれらを再現することが容易である．本稿では計算のベースを直交格子にしながら，複雑な境界形状を有する都市域の氾濫現象を解析するモデルの構築を行った．任意境界の再現として境界埋め込み（Immersed Boundary）法を用いる．また，FDS 法（Flux Difference Splitting）を用い氾濫流のような不連続を伴う流れ場に対する計算の安定化を図った．開発したモデルを用いて，街路網を模擬した氾濫模型実験の計算を行い，その適用を検証した．

## 2. 基礎方程式と離散化

基礎方程式として保存形で示された 2 次元浅水流方程式を用いる．2 次元浅水流方程式は $\boldsymbol{U}$ を保存量ベクトル，$\boldsymbol{E}$ と $\boldsymbol{F}$ をそれぞれ $x$ と $y$ 方向の流束ベクトル，$\boldsymbol{S}$ を発生項・消滅項ベクトルとすると

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial y}+\boldsymbol{S}=0 \tag{1}$$

ここで，

$$\boldsymbol{U}=\begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix},\quad \boldsymbol{E}=\begin{pmatrix} uh \\ u^2h+\frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{pmatrix},\quad \boldsymbol{F}=\begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h+\frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix},\quad \boldsymbol{S}=\begin{pmatrix} 0 \\ -gh(S_{ox}-S_{fx}) \\ -gh(S_{oy}-S_{fy}) \end{pmatrix} \tag{2}$$

ここに，$h$ は水深，$u$ と $v$ はそれぞれ $x$ と $y$ 方向の流速，$g$ は重力加速度，$S_{ox}$ と $S_{oy}$ はそれぞれ $x$ と $y$ 方向の河床勾配，および $S_{fx}$ と $S_{fy}$ はそれぞれ $x$ と $y$ 方向の摩擦勾配である．摩擦勾配 $S_{fx}$ と $S_{fy}$ は，マニングの公式で計算される．これらの基礎式の解析には FDS を用いた．式 (1) の浅水流方程式へ境界埋め込み法（Immersed Boundary Method）を適用する．すなわち，式 (1) の運動方程式を前進差分によって時間的に離散化し，速度のディレクリ境界条件を表す外力項を導入すると，次のようになる．

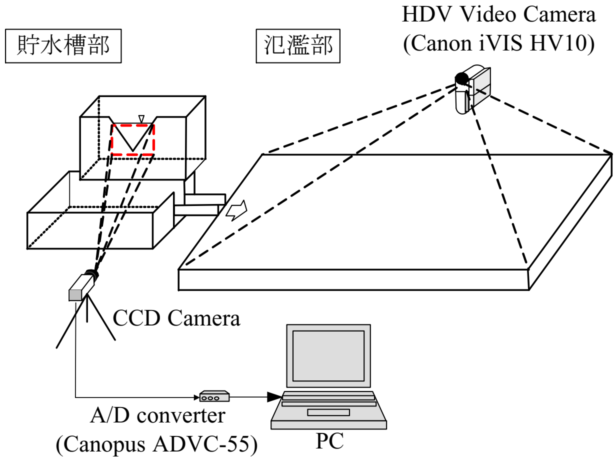
$$\frac{\boldsymbol{U}^{n+1}-\boldsymbol{U}^{n}}{\Delta t}=[1-\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{b})]\left(-\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial x}-\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial y}-\boldsymbol{S}\right)+\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{b})\frac{\hat{\boldsymbol{U}}^{n+1}-\boldsymbol{U}^{n}}{\Delta t} \tag{3}$$

ただし，$\boldsymbol{x}$ と $\boldsymbol{b}$ は速度境界条件を与える格子位置を表す．また，$\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{b})$ は $\boldsymbol{b}$ に一致する場合には 1 となり，それ以外の流体領域においては 0 となるデルタ関数である．$\hat{\boldsymbol{U}}^{n+1}$ は，補間によって求めるフラックスである．補間法には多方向線形補間を用いた．すなわち，この計算では，計算格子が境界上にある場合（$\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{b})=1$）は補間によって流速成分を求め，それ以外（$\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{b})=0$）では FDS による通常の流れ場の計算を行う．

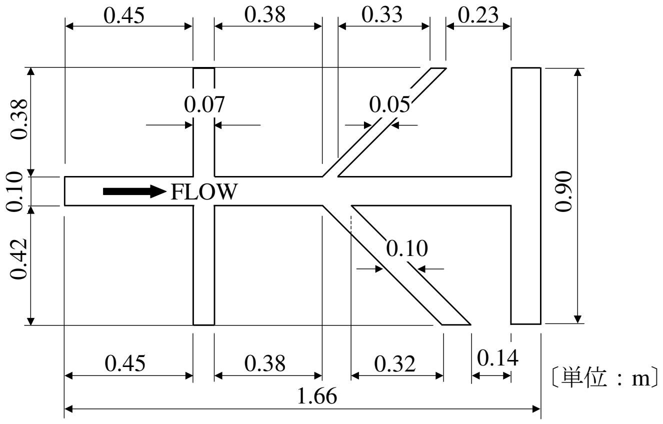
## 3. 実験の概要

**図–1** に実験装置の概略図を示す．実験装置は貯水槽部と氾濫部により構成されている．

Masashi OZONO, Yukari NAKAMURA and Ichiro FUJITA




（a）実験水路の概形



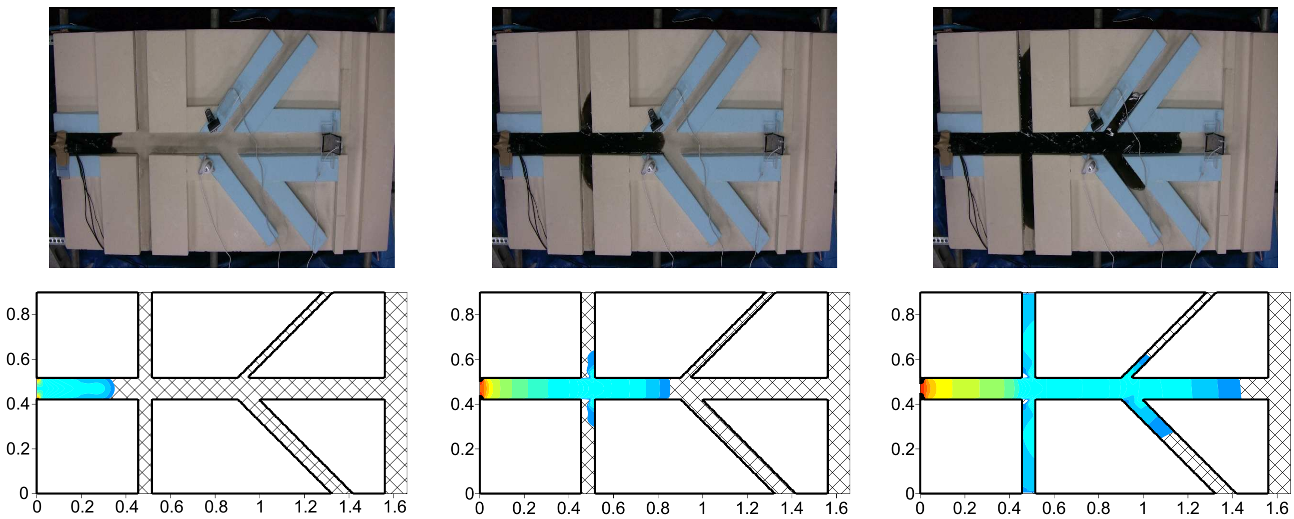

（b）氾濫部の詳細

**図–1**　実験装置の概略図

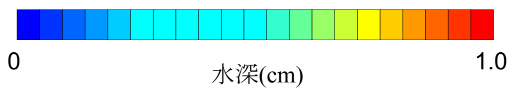
**図–1（a）**に示す貯水槽部は流出口を三角堰にしたコンテナとそれを受ける容器からなり，この容器と氾濫部をアクリル板で接続している．**図–1（b）**に示した氾濫部は，180×90cm のスタイロフォーム（押し出し発泡ポリスチレン断熱材）を材料としている．この氾濫部に道路形状を模した模型を設置している．模型の縮尺は 1/100，勾配は 1/500 である．この実験におけるマニングの粗度係数は，別の実験により 0.0123 と得られている．三角堰における越流水深を CCD カメラによって記録し，越流水深を用いた流量公式によって流量を求めた．また氾濫部上方にハイビジョンカメラを設置し，氾濫水の進行状況を撮影した．

## 4．実験結果と解析結果の比較

**図–2** に各時刻における氾濫水の水深分布の計算値と同じ時刻における実験時に撮影した氾濫水の進行状況の写真を示す．計算条件は上流に一定流量 0.5ℓ/s を与え，それ以外の部分からは自由流出とした．これらの図を参照すると，各時刻における氾濫水の水深分布は，実験時に撮影した写真の様子と同様の結果が得られていることがわかる．すなわち，実験と計算は定性的には一致していると言える．したがって，本解析モデルでは氾濫水の進行状況が再現されることが確認できた．




（a）0.5sec　（b）3.0sec　（c）7.0sec




**図–2**　実験結果と解析結果の比較