

# 都市型水害予測モデル MC-FLOOD を用いた 水害予測のリアルタイムシミュレーションに向けて

高 椋 恵<sup>i</sup>, 眞鍋 尚<sup>ii</sup>

## Real-Time Simulation of Flood Forecasting Using the Urban Flood Prediction Model MC-FLOOD

Kei TAKAMUKU, Takashi MANABE

当部では、これまで都市型水害に関する受託解析を十数年にわたり実施してきた。また近年、水害が頻発しており、益々、水害に関する解析が必要とされている状況から、都市型水害解析ソフトウェア MC-FLOOD の開発を行ってきた。一方、観測技術や降雨予測の技術が発展しており、リアルタイムシミュレーションが実施可能となってきた。本報では MC-FLOOD の概要を説明するとともにリアルタイムシミュレーションに関する状況及び簡易なデータ同化モデルを構築し検証する。

(キーワード):都市型水害, MC-FLOOD, データ同化, 粒子フィルタ

### 1 はじめに

当部では、これまで「都市型水害」に関する受託解析を十数年にわたり実施してきた。また近年、集中豪雨や短時間降雨による水害が頻発しており、益々、水害に関する解析が必要とされている状況から、受託解析の経験とノウハウをベースに都市型水害解析ソフトウェア MC-FLOOD の開発<sup>1,2)</sup>を行ってきた。

想定外の水害が頻発している中、河川においては、危機管理水位計を設置し、リアルタイムの河川水位の状況も把握できるようになっており、降雨の情報と合わせて、避難のための情報発信も充実してきている。

一方で、日本の河川は急峻であることが多く、特に中小河川の場合、降雨状況によっては河川水位の上昇が速く、避難が遅れることで人的被害が発生する可能性がある。

このような状況下で、リアルタイムの河川水位および予測降雨のデータと水害予測システムを組み合わせたリアルタイムにシミュレーションを実施し、迅速な避難につなげる事例が広がりつつある。

現在、当部が開発してきた都市型水害予測ソフトウェアを発展させ、リアルタイムシミュレーション機能を追加したソルバーを開発しており、その機能と計算事例を紹介する。

### 2 都市型水害予測システム MC-FLOOD 概要

#### 2.1 開発経緯

MC-FLOOD は、当部の都市型水害予測に関する受託解析の経験とノウハウをベースとし、開発を実施してきた。開発に当たっては、公益財団法人下水道新技術機構が発行している流出解析モデル利活用マニュアル（雨水対策における流出解析モデルの運用手引き）<sup>3)</sup>や国土交通省国土技術政策総合研究所が発行している都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン（案）<sup>4)</sup>に掲載されており、国内で広く利用されている代表的な都市型水害解析ソフトウェアの特徴について調査を行い、必要な機能を取り込んだ。次節に MC-FLOOD のモデル構成について示す。

<sup>i</sup> サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 主任コンサルタント 技術士（建設部門）

<sup>ii</sup> サイエンスソリューション部 先進技術システムチーム 次長 博士（工学）

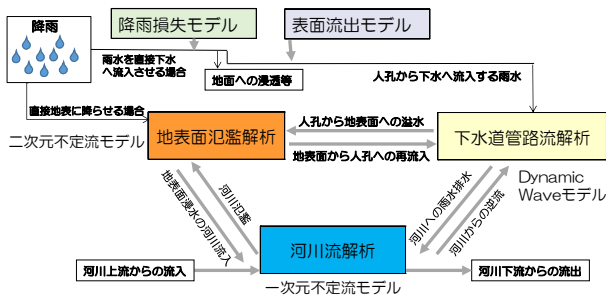


図 1 MC-FLOOD の概要

2.2 モデル構成

2.2.1 モデル全体像

MC-FLOOD では下水道・河川・地表面を統合して解析可能であるが、入力データの収集状況や計算コストを鑑み、解析パターンを選択できる。MC-FLOOD の概要を図 1 に示す。大きく 5 つの解析モデル（降雨損失モデル、表面流出モデル、地表面氾濫解析、下水道管路流解析、河川流解析）から構成されており、各解析モデルの詳細を次節以降に示す。

2.2.2 降雨損失モデル

降雨損失モデルは降雨量に対して、有効降雨を算定するモデルである。MC-FLOOD において、表-1 に示すモデルを組み込んでいる。

2.2.3 表面流出モデル

表面流出モデルは、人孔に流入する流量を有効降雨から算定するモデルである。MC-FLOOD において、表-1 に示すモデルを組み込んでいる。

2.2.4 地表面解析モデル

地表面氾濫解析モデルは、3次元の非圧縮性流体の基礎方程式に浅水流近似を施した連続の式(3)および運動方程式(1)、(2)を使用する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q_{rain} + q_{manhole} + q_{river} \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{(u^2 + v^2)}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 N \sqrt{(u^2 + v^2)}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

ここで、 $h$  : 水深[m],  $u$  :  $x$  方向断面平均流速 [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $v$  :  $y$  方向断面平均流速 [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $M(=uh)$  :  $x$  方向流量フラックス [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ],  $N(=vh)$  :  $y$  方向流量フラックス [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ],  $H$  : 水位[m],  $t$  : 時間[s],  $g$  : 重力加

表 1 降雨損失モデルと表面流出モデルの種類

No	降雨損失モデル	No	表面流出モデル
1	一様浸透損失モデル	1	タイムエリア法
2	ホートンモデル	2	非線形貯留法
3	流出係数モデル	3	二重線形貯留法
4	一様浸透モデル	4	線形貯留法
5	f1-Rsaモデル	5	Kadoya法
6	Green-Amptモデル	6	ラショナル法(合理式)
7	Hornerモデル	7	(SCS)単位図法

速度 [ $m \cdot s^{-2}$ ],  $n$  : マニングの粗度係数 [ $s \cdot m^{-1/3}$ ],  $q_{rain}$  : 降雨量 [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $q_{manhole}$  : マンホールからの溢水量 [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $q_{river}$  : 河川からの越水量 [ $m \cdot s^{-1}$ ]である。

2.2.5 下水道解析モデル

下水道解析モデルは、管きよについては、次に示す連続の式(3)と運動方程式(4)を使用する。

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} + \frac{\partial(U_s Q_s)}{\partial x} = -g A_s \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn_s^2 Q_s |U_s|}{R_s^{4/3}} \quad (4)$$

ここで、 $A_s$  : 流水断面積 [ $m^2$ ],  $Q_s$  : 管きよ内の流量 [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ],  $U_s$  : 管きよ内の断面平均流速 [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $H$  : 水位[m],  $n_s$  : 管きよのマニングの粗度係数 [ $s \cdot m^{-1/3}$ ],  $R_s = A_s/S_s$  : 管きよの径深[m],  $S_s$  : 管きよの潤辺[m],  $t$  : 時間[s],  $g$  : 重力加速度 [ $m \cdot s^{-1}$ ]である。

式(3)および式(4)に満管状態を開水路と同じように解析することができるプライスマンスロットモデルを適用すると、 $A_s$ は式(5)および式(6)のように表される。

$$A_s = \begin{cases} A_{s0} & (A_s \leq A_{s0}) \\ A_{s0} + B_s(h_s - D) & (A_s > A_{s0}) \end{cases} \quad (5)$$

$$B_s = \frac{gA_{s0}}{a^2} \quad (6)$$

ここで、 $A_{s0}$ ：管きよの流水断面積[m<sup>2</sup>],  $A_{s0}$ ：管渠の断面積[m<sup>2</sup>],  $B_s$ ：スロット幅[m],  $h_s$ ：水深[m],  $D$ ：管きよ高さ[m],  $a$ ：圧力波の伝搬速度[m・s<sup>-1</sup>],  $g$ ：重力加速度[m・s<sup>-2</sup>]である。また、マンホールについては、次に示す連続の式(7)を使用する。

$$A_m \frac{\partial h_m}{\partial t} = \sum Q_{sin} + Q_{in} - Q_{out} \quad (7)$$

ここで、 $A_m$ ：マンホールの断面積[m<sup>2</sup>],  $h_m$ ：マンホール内の水深[m],  $t$ ：時間[s],  $Q_{sin}$ ：管きよからの流入流量[m<sup>3</sup>・s<sup>-1</sup>],  $Q_{in}$ ：地表面からマンホールへの流入流量[m<sup>3</sup>・s<sup>-1</sup>],  $Q_{out}$ ：ポンプの排水流量[m<sup>3</sup>・s<sup>-1</sup>]である。

### 2.2.6 河川解析モデル

河川解析モデルは、次に示す連続の式(8)と運動方程式(9)を使用する。

$$\frac{\partial A_r}{\partial t} + \frac{\partial Q_r}{\partial x} = q_r + q_s \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q_r}{\partial t} + \frac{\partial(U_r Q_r)}{\partial x} = -gA_r \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn_r^2 Q_r |U_r|}{R_r^{4/3}} \quad (9)$$

ここで、 $A_r$ ：河川の流水断面積[m<sup>2</sup>],  $Q_r$ ：河川の流量[m<sup>3</sup>・s<sup>-1</sup>],  $U_r$ ：河川の断面平均流速[m・s<sup>-1</sup>],  $H$ ：水位[m],  $n_r$ ：河川のマンニングの粗度係数[s・m<sup>-1/3</sup>],  $R_r = A_r/S_r$ ：河川の径深[m],  $S_r$ ：河川の潤辺[m],  $t$ ：時間[s],  $g$ ：重力加速度[m・s<sup>-2</sup>]である。

### 2.2.7 離散化手法

地表面氾濫解析モデルはデカルト座標系とし、差分法により空間的に離散化する。また水深  $h$  と  $x$  方向および  $y$  方向流量フラックスを互い違いに配置するスタッガード格子を用いる。式(2)および式(3)における左辺第2項、第3項については1次精度風上差分を用い、それ以外の空間微分には中央差分を用いる。時間方向には2次精度である Leap-Frog 法を用いて時間積分する。さらに式(2)および式(3)における右辺第2項については半陰解法を用いる。下水道解析および河川解析モデルは地表面氾濫と同様に離散化する。

## 3 リアルタイムシミュレーション

### 3.1 現状

地表面、下水道、河川をモデル化し、初期条件及び境界条件を設定して下水管や河川の水位、地表面の浸水深を計算するような都市型水害予測ソフトウェアは、これまで浸水想定区域図の作成等に用いられてきた。これは、実際に洪水が発生する前に外力（例えば降雨）を想定し、河川水位、人孔水位及び浸水深等をあらかじめ予測するものである。

近年、河川水位の観測データをリアルタイムで取得できることや、短期予測降雨の情報を入手できるようになったことから、観測データとシミュレーションを組み合わせ、数時間後までの予測を実施するリアルタイムシミュレーションの取り組みが実施されつつある。

リアルタイムシミュレーションは上記のあらかじめの予測ではなく、今まさにどのような河川水位、人孔水位になっているかを反映させながら、予測降雨を与えて精度良く予測するものである。

例えば、早稲田大学（研究代表者：関根正人）<sup>4)</sup>では東京23区内で発生する浸水をリアルタイムで予測システムを公開している。地上・下水道・都市河川における雨水の流れを物理モデルで一体的に解くモデルによりリアルタイムシミュレーションを実施する試みが行われている。その他、藤枝市では、河川水位のリアルタイム予測を実施し、早期の避難や水防活動に繋げるために実証実験<sup>5)</sup>に加え、本格導入を見据えている。

### 3.2 研究状況

これまでは、ある外力（降雨）に対して、上述の地表面氾濫、下水道、河川における水の流れを解き、浸水想定区域図（ハザードマップ）作成し、広く住民に周知してきた。

一方で、近年、予測降雨の高精度化及び河川水位等の現地観測データをリアルタイムで取得する事ができるようになり、想定する外力ではなく、予測降雨や河川水位等を活用し、現地リアルタイムにシミュレーションを行い予測する事が可能になってきた。

リアルタイムシミュレーションは物理モデルを用いたものだけでなく、AIを活用したものもあり、ここではいくつか紹介する。

### 3.2.1 AIを活用したリアルタイムシミュレーション

AIによる予測としては、一言ら<sup>9)</sup>が水位データおよび雨量データを学習データとして、深層学習により河川水位を予測するモデルを構築しており、学習には時間がかかるものの、6時間後までの計算時間は0.1秒程度とのことである。また、田村ら<sup>10)</sup>は、ダム運用を的確かつ確実に実施することを目的として、深層学習を用いてダム流入量及びダム下流の河川水位を予測するモデルを構築している。

### 3.2.2 物理モデルを活用したリアルタイムシミュレーション

物理モデルを活用した予測として、立川ら<sup>9)</sup>は、河川水位予測を目的として、河川の上流端流量を算定するモデルと河川水位を算定するモデルとに分離し、河川水位を算定するモデルに粒子フィルタを適用することで、少ない計算負荷により予測することができることを示している。

中村ら<sup>4)</sup>は土木研究所が開発した降雨、流出、氾濫を一体的に解くRRIモデル<sup>12)</sup>を用いて、粒子フィルタを用いたデータ同化手法を用いて河川水位予測をリアルタイムで実施する手法を構築し、予測可能である事を示している。

関根ら<sup>4)</sup>は、都市型水害に焦点を当てたリアルタイム洪水予測システム(S-uiPS)を開発している。このシステムでは、都市インフラ施設に関わるものを省略や簡略化などを行わずに忠実に反映させた洪水予測手法であり、モデル定数などのチューニングすべきパラメータがないのが特徴である。

渋谷ら<sup>11)</sup>は、河川と下水道を一体的に解く都市浸水解析モデルを用いて、下水道管渠の水位予測精度向上を目的とした検討を実施している。大規模数の仮想降雨パターンに基づく下水道網の水位分布について事前に計算しておく（事前データバンク作成）、データ同化時刻において観測水位と対応する計算水位の平均二乗誤差が最も小さくなる管渠網の水位分布の組の水位を初期値として適用して次の予測永計算を実施するモデルを構築し、検討を行っている。

### 3.2.3 物理モデルとAIを組み合わせたリアルタイムシミュレーション

AIを活用した洪水予測を実施する場合、河川水位やダム流量などの比較的データの取得が容易なものを対象としている事が多い。一方で、浸水域や浸水深などの時空間に分布するような予測をする場合、AI

に学習させるデータが少ない、もしくはないことが多い。これは、浸水深データを時空間で詳細に取得する事が難しいこと、浸水するような事象はまれであり、十分な学習データを取得するのが難しいことがあげられる。

このような背景の元、小槻ら<sup>7)</sup>は、前述のRRIモデルを用いて、対象とする流域におけるd4PDFの降雨データを条件として計算を多量に実施し、回帰学習器を用いたRandomForestによるアンサンブル学習を行うことで、比較的短時間で浸水を予測する検討を行っている。また菅原ら<sup>12)</sup>は、河川の流れ・河床変動解析ソフトウェアであるiRIC<sup>14)</sup>のうち、Nays2DFloodを用いて同様にRandomForestによる予測を行っているが、こちらは説明変数に降雨だけでなく、地形条件や氾濫流量等を加えたモデルを加え、流域や河川の特徴をとらえた予測を行っている。

## 4 都市型水害予測システムを用いたリアルタイムシミュレーションに向けて

### 4.1 データ同化

洪水予測にまつわるリアルタイムシミュレーションの研究状況に鑑み、洪水予測におけるデータ同化手法を整理する。リアルタイムシミュレーションにまつわる研究から整理したものを表に示す。

これらの中で、AIモデルが関わるものは学習に時間がかかるものの、予測時の計算は速いと考えられ、リアルタイムシミュレーションに向いている。一方、将来の変化（流域状況や雨の降り方）に対しては、再学習もしくは追加学習が必要となる。

物理モデルを用いて予測する場合、流域をモデル化して計算する必要があるため、それらの設定作業が膨大となることが多い。一方で力学に基づいたモデルであり、流域の変化に対しては適切な設定に修正することで、将来にわたって利用可能であると考えられる。また、気候変動の影響により現在の外力（雨の降り方等）が変わったとしても、降雨を適切に与えることで、精度を落とさずに予測することでできると考えられる。

今後、将来にわたって流域や外力の変化に対応しながら、計算精度を担保しつつ、予測を実施していくためには、物理モデルをベースに予測する手法が求められると考えられる。物理モデルによるリアルタイムシミュレーションではデータ同化手法が用いられることが多いが次節にてデータ同化手法の概略を

整理する。

4.1.1 手法

大林ら<sup>15)</sup>に従うとデータ同化手法は大きく2つに分類する事が出来る。

前者については、制御でよく利用されるカルマンフィルタ等があり、後者については、気象分野において良く用いられる4次元変分法がある。

河川分野においては、立川ら<sup>9)</sup>が逐次型の粒子フィルタによる河川流れに焦点を当て、河川水位の実時間予測の検討をしている。また、西口ら<sup>18,19)</sup>は、4次元変分法を用いた河川水位や上流端流量の推定を検討している。

水害に関するリアルタイムシミュレーションでは、物理モデルを活かしつつ、実装が比較的容易であり、実績のある逐次型の粒子フィルタ<sup>15-17)</sup>に焦点を当て、手順について説明する。

4.1.2 粒子フィルタを用いた計算事例

最初に粒子フィルタの計算手順を示した上で、計算事例として、仮想的に作成したトイモデルを用いた双子実験を示す。河川解析にのみ焦点を当て、粒子フィルタの手続きについて記載する。粒子フィルタの概念図<sup>16)</sup>は図2に示すとおりである。

粒子フィルタを用いた計算手順は次の①～④で行う。後述するトイモデルに合わせて適宜、尤度に関するパラメータや擾乱の与え方について説明を追加する。

- ① 河川解析の基礎方程式である式(8)(9)を解くことで予測値を求める。
- ② 以下の式により、尤度を求める。本事例では、河川水位(水深)を観測値とする。各粒子の尤度は式(10)に示すとおりである。

$$\tilde{w}_t^{(i)} = \frac{1}{\sqrt{2\sigma_y^2}} \exp \left\{ -\frac{(h_{t,cal}^{(i)} - h_{t,obs})^2}{2\sigma_y^2} \right\} \quad (10)$$

ここで、 $h_{t,cal}^{(i)}$  : 時刻 t, 粒子 i 番目の計算された河川水位(水深),  $h_{t,obs}$  : 観測された水位(水深),  $\sigma_y$  : 観測水深の標準偏差である。観測水深の10%程度を想定して、 $\sigma_y = 0.1h_{t,obs}$ とする。

- ③ ②で得られた各観測地点での尤度をもとに、粒

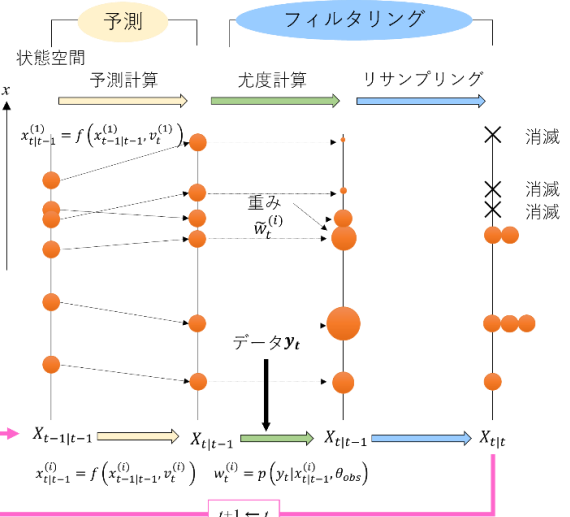


図2 粒子フィルタの概念図

子のリサンプリングを行う。観測値から外れたもの(尤度が小さい)ものは選ばれづらく、観測値に近いもの(尤度が大きい)ものは選ばれやすい。

- ④ ①の手順に戻る。①に戻るにあたり、立川ら<sup>8)</sup>のモデルに従い、式(11)に示すとおり、粗度係数 $n_t$ と上流端流量に乗ずる係数 $r_{q,t}$ に擾乱を与える。

$$n_t = n_{t-1} + \xi_n, r_{q,t} = r_{q-1,t} + \xi_q \quad (11)$$

$\xi_n \sim N(0, \sigma_n^2)$ ,  $\xi_q \sim N(0, \sigma_r^2)$  として,  $\sigma_n^2 = (0.0005)^2$ ,  $\sigma_r^2 = (0.3)^2$ とする。

以上の手順を用いて、双子実験により、粒子フィルタを用いたリアルタイムシミュレーションの事例を示す。計算事例の条件は表に示すとおりである。なお双子実験とは、あらかじめ計算モデルにより成果位置を計算しておき、それらを用いてデータ同化実験を行い、同化手法の有効性を検証するものである。真値として設定した断面及びその結果は図3および図4に示すとおりである。

トイモデルは次のとおり想定する。全長18kmの河川とし、分合流はないとする。川幅は上流から下流に向かって20m, 30mおよび50mの川幅とし、形状は矩形断面とする。河床勾配は上流から下流に向かって1/300, 1/2000および1/400とする。上流端流量は図4の中段に示す波形とし、下流端は通水断面積Aに関する勾配が0となるように設定する。

河川水位の計算結果は、図4の下段に示すとおりである。upperは上流, middleは中流, bottomは下流

地点における河川水深の時系列である。

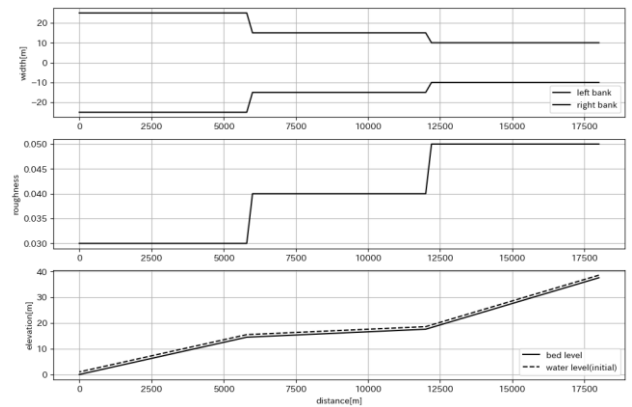
データ同化の問題設定として、上流端流入量が予測されており、上流および下流における河川水位（水深）が観測されているものとして中流の河川水位を推定する。また比較のため、粒子数を 10, 100 及び 500 とした場合の結果について併せて示す。

データ同化を用いて中流域の河川水深を推定した結果は図 5 に示すとおりである。上段から粒子数 10, 100 及び 500 である。粒子数が増えるに従い、真値に対して水深の状態推定の精度が向上している。中流域の真値とフィルタリング推定値を比較したものは図 6 に示すとおりである。断面が矩形であったり、河床勾配も区間ごとに一定であったりと比較的単純なモデルの為、違いがわかりづらいが、MSE（平均二乗誤差）を比較すると、粒子数を多くすることで、予測精度が高くなることが確認できる。

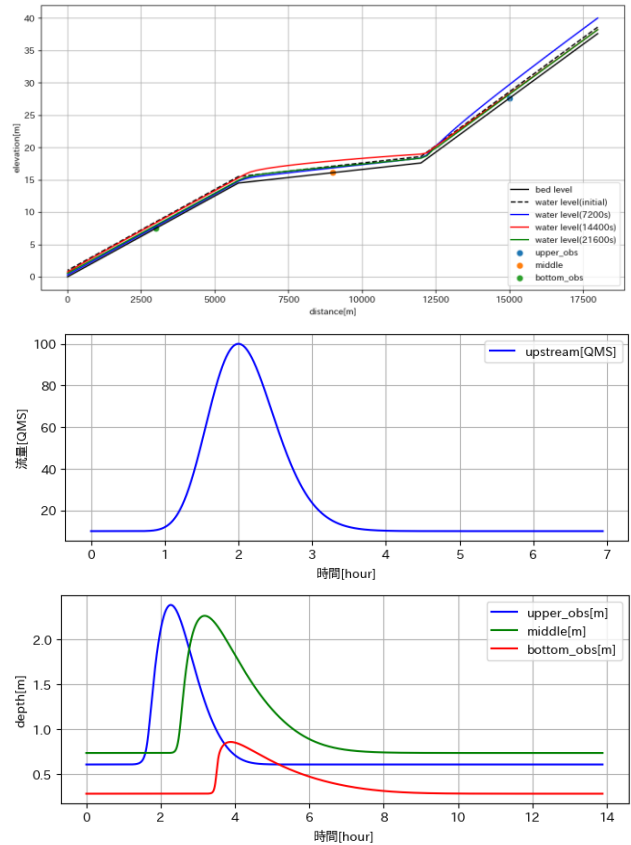
その他、計算終了時の粗度係数の分布は図 7 に示すとおりである。推定値は真値周辺でばらついており、粒子数が多くなるにしたがって、そのばらつきが小さくなるのがわかる。

本事例では、比較的単純なトイモデルを想定し、粒子フィルタのアルゴリズムを整理・構築したものである。双子実験により状態量が真値付近で推定できていることから、概ね予測出来ることを確認した。

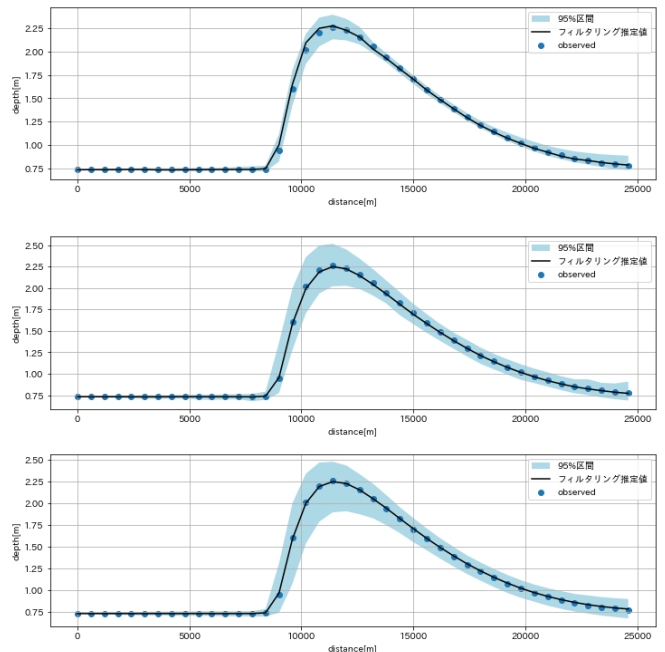
今後の MC-FLOOD を用いたリアルタイムシミュレーションでは、河川だけのモデルではなく、下水道や地表面を組み合わせたモデルにし、浸水深の推定までを実施できるシステムを構築中である。



上段：左右岸の位置，中段：粗度係数，下段：河床高  
図 3 河道断面等の設定



上段：水位縦断，中段：上流端流量  
下段：上流、中流、下流地点の水深時系列  
図 4 真値及び観測値とみなす計算結果



上段：粒子数 10，中段：粒子数 100，下段：粒子数 500  
図 5 middle 地点におけるフィルタリング推定値

などが考えられる。また、下水道を加えたモデルも考えられ、地表面、河川、下水道を含めたリアルタイムシミュレーションの構築と検証を実施する予定である。

### 5 おわりに

本報告では、都市型水害予測モデル MC-FLOOD の概要の説明、リアルタイムシミュレーションの実例、研究状況、粒子フィルタを用いた計算事例について説明した。

今後も開発した都市型水害予測モデル MC-FLOOD をさらに発展させ、リアルタイムシミュレーションの機能を追加し、今後とも都市型水害に関するシミュレーションの発展に貢献していく。

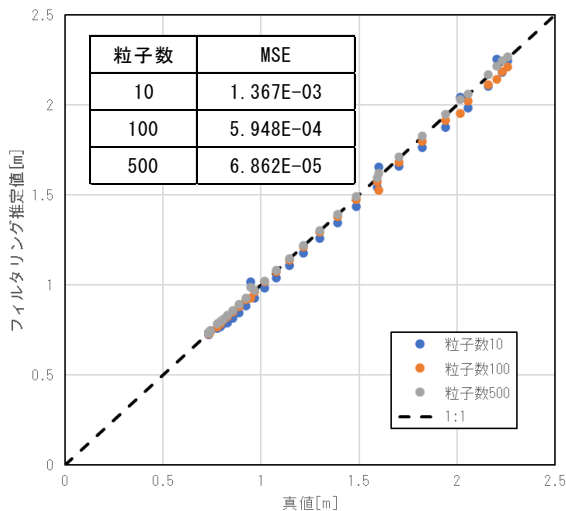
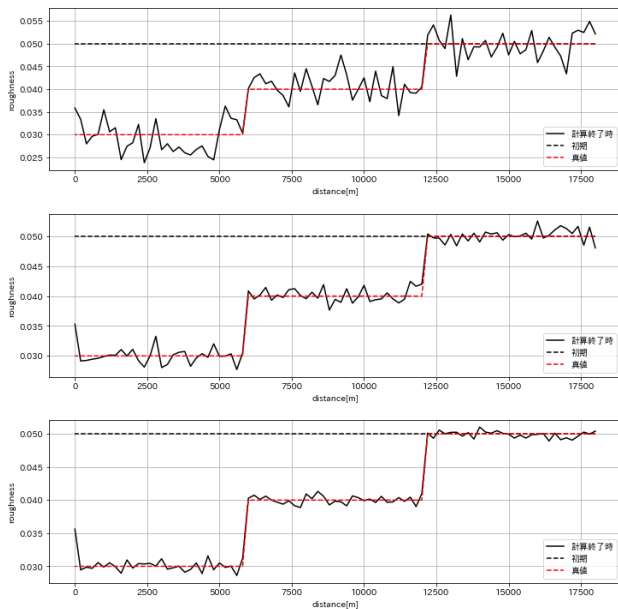


図 6 粒子数別の真値と推定値の比較



上段：粒子数 10，中段：粒子数 100，下段：粒子数 500

図 7 計算終了時の粗度係数の推定値

### 4.2 今後の展開

水害にまつわるリアルタイムシミュレーションの手法と粒子フィルタを用いた計算事例を示した。本報で示した計算事例は河川解析にのみのモデルであり、上流端流量は与条件としたものである。実用的なものとする場合は、予測降雨から、貯留関数法やタンクモデルを用いて流量推定を実施する、もしくは MC-FLOOD の地表面氾濫解析のように平面二次元モデルに予測降雨を与えて直接河川流量を算定するな

### 引用文献

- 1) 高橋昌伸, 溝内秀男, 眞鍋尚: 都市型水害解析の現状と展望, みずほリサーチ&テクノロジーズ技報, 第1巻(2021)39-44.
- 2) 公益財団法人日本下水道新技術機構: 下水道施設の耐水化計画および対策立案に関する手引き (2021)337-359.
- 3) 中村徹立, 佐々木淑充, 水草浩一: 都市域氾濫解析モデル活用ガイドライン(案)-都市浸水-, 国土技術政策総合研究所資料, 第202号(2004)1-33
- 4) 早稲田大学, リアルタイム浸水予測システム(S-uiPS), [https://www.waseda.jp/top/news/83042\(2023-10-31\)](https://www.waseda.jp/top/news/83042(2023-10-31)).
- 5) 藤枝市, 県内初! AIを活用した河川水位予測実証実験, [https://www.city.fujieda.shizuoka.jp/soshiki/kikakuzaisei/johoseisaku/oshirase/15230.html\(2023-10-31\)](https://www.city.fujieda.shizuoka.jp/soshiki/kikakuzaisei/johoseisaku/oshirase/15230.html(2023-10-31)).
- 6) 一言正之, 櫻庭雅明, 清雄一: 深層学習を用いた河川水位予測手法の開発, 土木学会論文集 B1, 第72巻4号(2016)187-192.
- 7) 小槻峻司, 桃井裕広, 菊池良太, 渡部哲史, 山田直史, 阿部紫織, 綿貫翔: 回帰学習器のアンサンブル学習による降雨洪水氾濫モデル・エミュレータ, 土木学会論文集 B1, 第76巻2号(2020)367-372.
- 8) 中村要介, 小池俊雄, 阿部紫織, 中村和幸, 佐山敬洋, 池内幸司: 粒子フィルタを適用した RRI モデルによる河川水位予測技術の開発, 土木学会論文集 B1, 第74巻5号(2018)381-386.
- 9) 立川康人, 須藤純一, 椎葉充晴, 萬和明, キム スンミン: 粒子フィルタを用いた河川水位の実時間

- 予測手法の開発, 土木学会論文集 B1, 第 67 巻 4 号(2011)511-516.
- 10) 田村和則, 加納茂紀, 三浦心, 山脇正嗣, 金子拓史: ダム流入量長時間予測への深層学習の適用-ダム防災操作の効率化を目指して-, 土木学会論文集 B1, 第 74 巻 5 号(2018)1327-1332.
- 11) 渋尾欣弘, 呉連慧, 田島芳満, 山崎大, 佐貫宏, 古米弘明: 管渠水位の事前計算データバンクを用いたデータ同化による浸水解析の精度向上とポンプ操作の感度分析, 土木学会論文集 B1, 第 75 巻 2 号(2019)199-204.
- 12) 菅原巧, 三谷泰浩, 川野浩平, 谷口寿俊, 本田博之, 堀真輝也, 佐藤辰郎: ランダムフォレストを用いた洪水氾濫動態の推定に関する研究, 河川技術論文集, 第 27 巻(2021)81-86.
- 13) RRIModel ダウンロードサイト: 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センターホームページ, [https://www.pwri.go.jp/icharm/research/rri/index\\_j.html](https://www.pwri.go.jp/icharm/research/rri/index_j.html)(2023-10-31).
- 14) iRIC Software: 一般財団法人 iRIC-UC, [https://i-ric.org/ja/\(2023-10-31\)](https://i-ric.org/ja/(2023-10-31))
- 15) 大林茂, 三坂孝志, 加藤博司, 菊池亮太: データ同化流体科学 波動現象のデジタルツイン(共立出版, 2021).
- 16) 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田亮: データ同化入門-次世代のシミュレーション技術-(朝倉書店, 2011).
- 17) 樋口知之: 予測に生かす統計モデリングの基本改訂第 2 版 ベイズ統計入門から応用まで(講談社, 2022).
- 18) 西口亮太, 壇鉄也: 随伴変数法による水位縦断分布のリアルタイム予測に関する研究, 河川技術論文集, 第 23 巻(2017)275-280.
- 19) 西口亮太, 田方俊輔, 陰山建太郎, 泉典洋, 関根正人: 河川流の逆解析・データ同化に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B1, 第 76 巻 1 号(2020)30-41.