

# 中小河川を対象とする河川水位予測手法 の構成法について

FRAMEWORK OF REAL-TIME WATER STAGE FORECASTING  
FOR SMALL-AND-MEDIUM-SIZED RIVERS

立川康人<sup>1</sup>・須藤純一<sup>2</sup>・市川 溫<sup>3</sup>・椎葉充晴<sup>4</sup>

Yasuto TACHIKAWA, Junichi SUDO, Yutaka ICHIKAWA and Michiharu SHIIBA

<sup>1</sup>正会員 博(工) 京都大学准教授 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

<sup>2</sup>学生会員 学(工) 京都大学修士課程 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 京都大学助教 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

<sup>4</sup>正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

Development of a real-time flood forecasting method which enables to predict water stage for a small-and-medium-sized river, in particular for a river section where a rating curve does not exist, is an urgent task to reduce flood disaster damages. In this study, we examine the simulated water stage obtained by a kinematic routing model embedded in our distributed hydrologic model operated at the Yodo River basin. For the flood by the typhoon No. 23 in 2004, the flood marks along the Katsura River is compared with simulated flood stages. It was found that simulated discharge is insensitive to the river routing model parameters (the Manning roughness coefficient and a setting method of channel cross section). However, simulated water stage was quite sensitive to the parameters. Based on the simulation results, a framework of a real-time stage forecasting method for small-and-medium-sized catchment is discussed.

**Key Words :** Real-time flood forecasting, water-stage forecasting, distributed hydrologic model, small-and-medium-sized rivers, flood routing

## 1. はじめに

平成16, 17年は、計画規模に匹敵する、あるいはそれを上回る極めて大きな洪水がしばしば発生し、特に県管理の中小河川流域において多くの被害が出た。こうした河川流域は今後とも高い治水整備を実現することは容易ではなく、確度の高い洪水予測情報を提供して、それに基づく的確な避難体制を構築することが洪水災害による被害を軽減する基本となる。

中小河川流域を洪水予測の対象とする場合、観測データの蓄積が不十分な場合が多く、流出予測モデルを構築することが困難なことが多い。この困難を克服するためには、特定の中小河川を洪水予測の対象とするのではなく水系全体を対象とする詳細な分布型流出予測モデルを構築し、観測情報が存在する複数観測地点での適合性を確認することで予測モデル全体の適合性を仮定する、次に観測値の存在しない地点での予測値を水系全体の予測モデルから取り出すという手順を考える必要がある。こ

うした予測システムの一例として、筆者らは淀川流域(枚方上流域7,281km<sup>2</sup>)を対象として広域の分布型実時間流出予測システムを試験的に運用し、6時間先までの河川流量予測値をホームページを通して閲覧可能としている(<http://yodogawa.kuciv.kyoto-u.ac.jp/>)<sup>1)2)</sup>。

このような実時間流出予測システムが、現実の水工現場で実際に利用されるためには、流出システムの課題として、次の2つを克服する必要があると考える。

- 1) 流量でなく水位、特に水位流量曲線が存在しない河道区間での水位予測を実現する必要がある。これまで水文流出予測では、流量の予測に重点を置いて、水位の予測には十分な関心を払ってこなかった。しかし、実際に必要とされるのは河川水位である。
- 2) 既存の河川水位・流量のリアルタイム観測値を最大限利用して、観測の存在しない地点を含めてモデル状態量の初期値を適切に推定する必要がある。初期状態の推定が悪ければ、降雨予測の精度が高まっても流出予測の精度を向上させることはできない。従来より、カ

ルマンフィルター理論を用いたモデル状態量の最適推定を導入した実時間流出予測手法が数多く提案されているが<sup>3~5)</sup>など、水系一体とした大規模なフィルタリングシステムの研究は不十分である。

本研究では、これらの課題のうち 1)に焦点を絞り、これまで流量予測を目的としてきた分布型流出モデルから水位を予測した結果と問題点を示す。次に、流域一体とした分布型流出予測モデルに水位予測を取り入れるための実時間洪水予測システムの構成法を検討する。2)の課題は別途検討を進めているが<sup>6)</sup>、紙数の都合上ここでは触れない。以下、2. では本論で用いる分布型流出予測モデルを示す。3. では 2. で述べる分布型流出モデルを予測エンジンとする実時間流出予測システムの概要を示す。4. では淀川流域の中で桂川流域(1,100km<sup>2</sup>)に着目し、平成16年の台風23号での洪水痕跡水位と計算水位との比較結果を示す。5. ではその結果として、流域一体とした実時間流出予測システムにおける水位予測のモデル構成法を議論する。

## 2. 分布型流出予測モデルの概要

### (1) 分布型流出モデルの基本構成

流出予測モデルは市川ら<sup>7)</sup>が開発した分布型流出モデルを基本とする。そのために椎葉ら<sup>8)</sup>による流域地形の数値表現形式を採用し、国土地理院が発行する数値地図250m(標高)を用いて250mの空間分解能で斜面要素の流れ方向を一次元的に決定する。

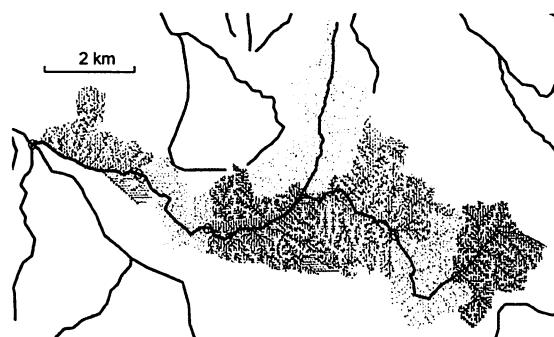


図-1 数値標高モデルと最急流れ方向によって決まる流域モデル。黒実線は河道網を表し、細線は斜面域の流れ方向を表す。

図-1に流域モデルの一部を示す。区分された河道とそれに寄与する斜面部分を一つの部分流域とし、河道区分の接続によって部分流域を相互に結合することにより、全体の流出モデルを構成する。部分流域は矩形の斜面要素の集合体とそれらが接続する河道区分によって表現される。流れ方向に従って、すべての矩形斜面要素での流れを逐次追跡して河道への流出量を算定する。また、河道における流れを追跡して、河川流量を算定する。流れの追跡計算には斜面部、河道部ともキネマティックウェーブモデルを用いる。

斜面部の土層は、重力水が発生する大空隙部分と毛管移動水の流れの場であるマトリックス部分から構成されると考える<sup>9)</sup>。土層厚を  $D$  とし、マトリックス部の最大水分量を水深で表した値を  $d_c$ 、重力水を含めて表層土壤中に存在し得る最大水深を  $d_s$  と考え、流量流積関係式(1)を仮定する。この流量流積関係式と連続式(2)を用いて上流の斜面要素から順次、雨水を追跡する。

$$q = \begin{cases} v_c d_c (h/d_c)^\beta, & 0 \leq h \leq d_c \\ v_c d_c + v_a (h-d_c), & d_c < h \leq d_s \\ v_c d_c + v_a (h-d_c) + \alpha (h-d_s)^m, & d_s < h \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2)$$

ここで

$$v_c = k_c i, v_a = k_a i, k_a = \beta k_c, \alpha = \sqrt{i/n}$$

であり、モデルパラメータは流量流積関係式を決定する  $n(\text{m}^{-1/3}\text{s})$ 、 $k_a(\text{m/s})$ 、 $d_c(\text{m})$ 、 $d_s(\text{m})$ 、 $\beta (-)$  となる。 $n$  は地表面流が発生する場合の等価粗度、 $k_a$  は重力水が卓越する A 層内の透水係数、 $\beta$  は重力水部と不飽和水部との飽和透水係数の比である。桂川流域では  $n=0.6\text{m}^{-1/3}\text{s}$ 、 $d_s=0.5\text{m}$ 、 $d_c=0.436\text{m}$ 、 $k_a=0.0082\text{m/s}$ 、 $\beta=25.0$  とした。この分布型流出モデルを実現するために水文モデル構築システム OHyMoS<sup>10)</sup>を利用し、全体の流出予測システムを部分流域流出モデル、河道流追跡モデル、湖沼モデル、ダムモデルの集合として構成する。河道流追跡モデルは 4. で述べる。

### (2) モデルの構築手順

流出予測システム構築の手順を以下に示す。

- 1) 国土数値情報の河道データと湖沼データを合成し、湖沼の湖岸線を含む河道網データを作成する。
- 2) 河道網を約3km毎に分割して河道区分データを作成し、この河道区間を単位として部分流域を構成する。河道の分割点では計算流量を出力するものとする。これにより2万5千分の1地形図に対応するほぼ任意の河道地点での予測結果を得ることになる。
- 3) 標高データから落水方向を決定する。流出モデルは空間分解能250mの落水線型の分布型流出モデルである<sup>7)</sup>。
- 4) 河道には、キネマティックウェーブモデルを適用して河道流追跡モデルを構築する。
- 5) 湖に対しては、湖流入量、雨量、湖からの放流量の連続関係から琵琶湖の水位変化を算定する湖沼要素モデルを構築する。
- 6) 流域内のダムを対象に、流況制御を表現するダム要素モデル<sup>11)</sup>を構築する。ダムモデルは、ダムへの流入量、ダム上流域の平均降雨量、および、連携操作の対象となるダムの操作過程を入力情報とし、ダムからの放流

量とダム貯水池の水位を予測するモデルである。

これら全ての要素モデルを接続して、流域全体の流出予測システムを構築する。淀川流域を対象とする詳しいモデル化に関しては佐山ら<sup>12)</sup>を参照されたい。

### 3. 分布型実時間流出予測システムの概要<sup>11,12)</sup>

(財)日本気象協会によるレーダー・アメダス実況雨量、超短時間予測（3時間先予測値まで）および気象庁による降水短時間予測（3時間から6時間先予測値）を入力データとし、2.で示した広域分布型流出予測モデルを予測エンジンとする実時間流出予測システムを試験運用して、6時間先までの河川流量予測値をホームページを通して閲覧できるようにしている<sup>11,12)</sup>。実時間流出予測システムの全体構成を図-2に示す。

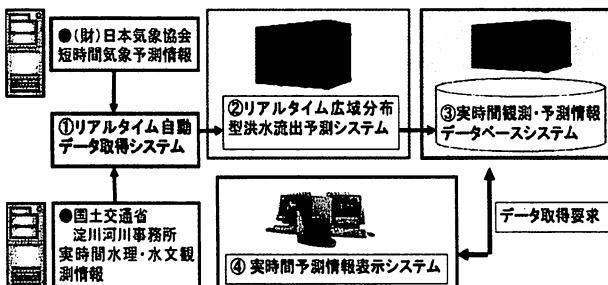


図-2 予測システムの全体構成

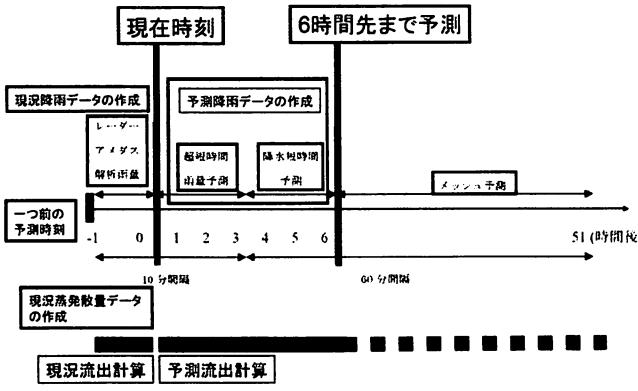


図-3 実時間流出計算の予測サイクル

実時間流出予測計算の予測サイクルを図-3に示す。実時間流出予測計算の全体の手順は以下のようである。

#### 1) 初期値および計算開始時刻の設定

流出モデルの初期状態量（すべての斜面および河道の計算差分ノードにおける水深）を決定する。初期状態は定常状態を仮定し、すべての地点での流出高が等しいとして決定する。定常状態を仮定するために、無降雨が続いた時点を初期計算時刻とする。

#### 2) 現況および予測降雨データの作成

(財)日本気象協会から配信される雨量実況・予測データをUTM座標系に変換し、最大51時間先までの雨量データ

タ（UTM座標系の横46個、縦66個の2.5km×2.5kmの格子）を毎時、自動的に作成する。

#### 3) 現況蒸発散量データの作成

アメダス観測点の気温、日照時間、風速および気象官署における水蒸気圧を毎時得て、現況・予測降雨データと同じ2.5km四方の格子を設定し、各格子に最も近いそれらの値をその格子での気象要素の値とする。気温はその格子での標高値をもとに補正する。次に、熱収支法を用いて格子毎に1時間分の蒸発散量を計算する。

#### 4) 現況流出計算

以上の準備をもとに現況流出計算を実施する。1)で流出予測モデルの初期水深を得たら、2)の現況雨量データおよび3)の現況蒸発散量データを用いて1時間前から現在時刻まで現況流出計算を実行する。現況流出計算終了時の状態が予測流出計算の初期条件となる。

#### 5) 予測流出計算

予測流出計算では、現況流出計算によって得られた現在時刻の状態量を初期値とし、6時間先までの流出予測計算を行う。このために現況流出計算で得られた計算終了時点での状態量を予測計算用の初期状態量として用いる。予測雨量は2)で示した予測降雨データを用い、蒸発散量は3)で得た現況の推定値が6時間先まで同じ値であるとして予測計算に用いる。

#### 6) 時間更新

1時間分、時間が経過したら、2)に戻って実時間予測計算を繰り返す。この場合、4)の現況流出計算の最終状態を次の1時間分の現況流出計算の初期状態とする。

### 4. 水位予測計算結果とその評価

#### (1) 河道流追跡モデル

キネマティックウェーブモデルを用いる。断面平均流量を $Q$ 、通水断面積を $A$ 、側方流入量（流出モデルから提供される流出量）を $q$ 、時間を $t$ 、計算区間上端からの距離を $x$ とすると、

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(t) \quad (3)$$

となる。運動方程式はマニング式を用いて、 $n$ をマニングの粗度係数、 $i_0$ を河床勾配、 $R$ を径深とすると

$$Q = \frac{\sqrt{i_0}}{n} AR^{2/3} \quad (4)$$

である。一般に径深 $R$ は、 $K$ と $Z$ をパラメータとして

$$R = KA^Z \quad (5)$$

と書くことができる。以上から

$$Q = \alpha A^m, \quad \alpha = \frac{\sqrt{i_0}}{n} K^{2/3}, \quad m = 1 + \frac{2Z}{3} \quad (6)$$

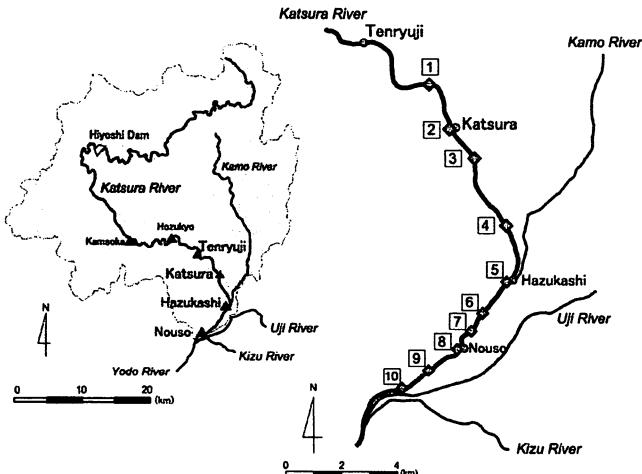


図-4 桂川流域と対象河川区間

である。河道流追跡モデルに河道横断面形状を反映させるためには横断面形状から  $R$  と  $A$  を算定し、式(5)に当てはめて  $K$  と  $Z$  を求めればよい。

## (2) 河道横断形状のパラメータ設定

式(5)の河道形状パラメータ  $K$  と  $Z$  を求めるにあたって

1) 実横断面形状から径深  $R$  を得て  $A$ - $R$  関係を設定する場合

2) 低水路と高水敷で断面を分け、合成径深  $R_c^{(1)}$  を得て  $A$ - $R_c$  関係を設定する場合

3) 幅広矩形断面を仮定する場合

の 3 通りを考えた。水位計算結果の比較を行うのは淀川流域のうち、図-4 に示す桂川の天竜寺地点から納所地点下流の 18km 区間である。この区間で約 200m ごとに 94 地点の横断面形状データを得た。1) と 2) の場合、この 94 地点で水深 0.1m から 0.01m 単位で水深を設定し、それに対応する通水断面積、径深、あるいは合成径深を求めた。次に、最小二乗法を用いて地点ごとに式(5)の  $K$  と  $Z$  の値を決定した。図-5 は納所地点における通水断面積と合成径深の関係および当てはめた式(5)を示したものである。

3) の幅広矩形断面を仮定する場合は、淀川流域において目視で判読した河道幅と流域面積との関係を求め、それを用いて河道幅を設定した。対象河道区間では、図-4 右図に示す評価地点 1 で 66.5m、評価地点 10 で 75.8m であった。1) 2) 3) の場合すべて、対象区間外は幅広矩形断面として、その地点の流域面積をもとに河道幅を定めた。

## (3) 対象洪水と計算条件

平成 16 年 10 月に日本中に甚大な水災害をもたらした台風 23 号による洪水を対象とし、対象区間に測定された洪水痕跡（左岸 58 地点、右岸 37 地点）と計算水位の最大値とを比較した。降雨データはレーダー・アメダス解析雨量（10 分間隔、2.5km 空間分解能）を用い、計算モデルは 2., 3. で示した分布型流出モデルを用い、得られた通水断面積を水位に変換して、地点ごとに洪水期間の

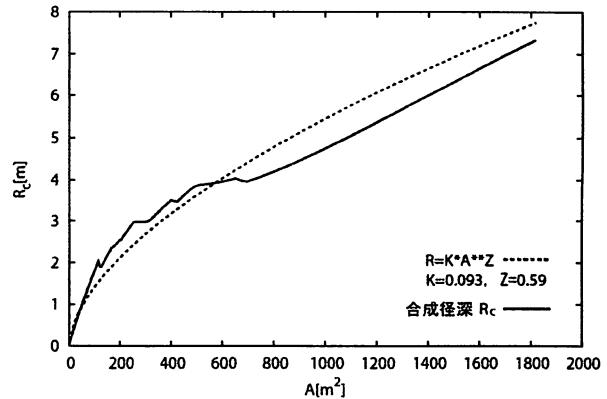


図-5 納所地点における通水断面積と合成径深の関係

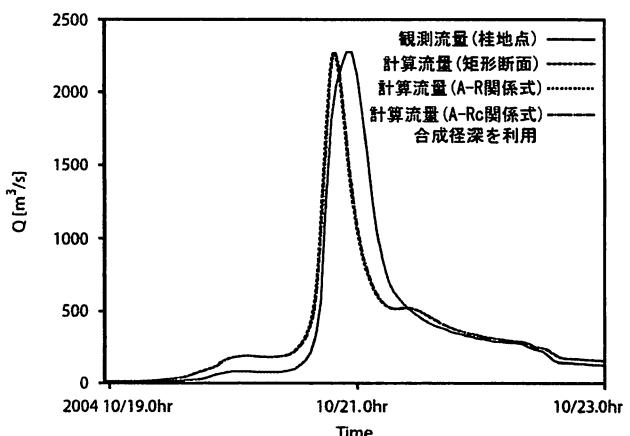


図-6 桂地点での観測流量と異なる横断面を設定した場合の計算流量

最大計算水位と洪水痕跡水位とを比較した。なお、水位の再現性を確認することが本章の目的なので、より現実に近い流出シミュレーションを実施するために、河道流追跡モデルの上流端を日吉ダム地点とし、日吉ダムの実績放流量をその地点で境界条件として与えた。

## (4) 水位の再現結果

図-6 に桂地点（図-4 右図の評価地点 2）での観測流量と計算流量を示す。計算流量は横断面形状の異なる設定方法を採用した場合の 3 つの場合を示している。粗度係数  $n$  の値は、すべてのケースでこの河道区間で従来より用いられている  $0.035m^{-1/3}s$  を設定した。図-6 からわかるように、横断面の設定方法によらず、流量の計算結果はほとんど一致する。この結果は図-4 の 10 箇所の評価地点でも同様の結果であった。

次に、洪水痕跡から得た通水断面積および水位とそれらの洪水ピーク時における計算結果を図-7, 図-8 に示す。これらの図では、図-4 右図の 10 地点での洪水痕跡から得た値と計算値とを示している。 $A$ - $R$  関係式または  $A$ - $R_c$  関係式を用いた場合の通水断面積は洪水痕跡から得た値よりもかなり大きく、結果として計算水位もかなり洪水痕跡を上回ることとなった。

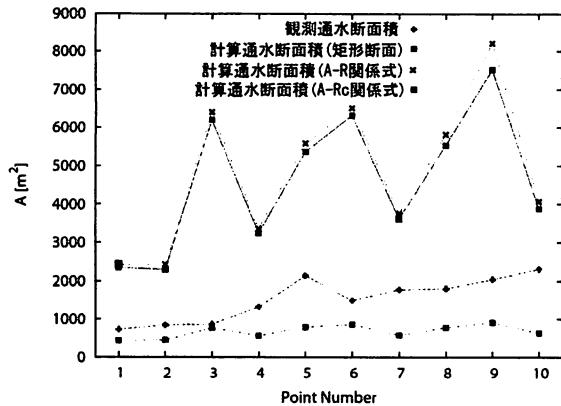


図-7 対象河川区間での洪水痕跡と横断面形状から得た通水断面積と洪水ピーク時の通水断面積の計算値との比較

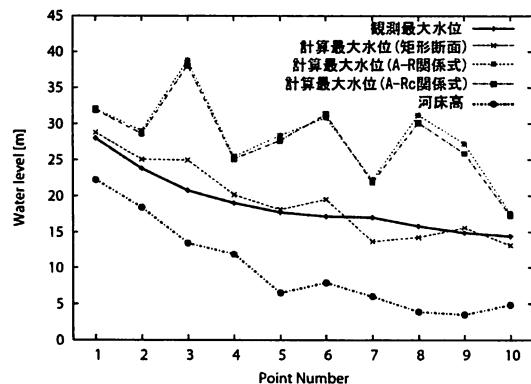


図-8 対象河川区間での洪水痕跡から得た水位と洪水ピーク時の計算水位との比較

桂地点(評価地点2)では観測流量が得られているので、洪水ピーク時の断面平均流速を概算すると、実測では2.6m/s, A-R関係式またはA-R<sub>c</sub>関係式を用いた場合は約1.0m/sとなり、流速を小さく見積もっていることが水位の過大評価の原因となっている。そこで、粗度係数を調整して通水断面積の変化を確認した。図-9は粗度係数を0.01から0.035m<sup>-1/3</sup>sまで変化させた場合の桂地点での通水断面積の違いである。洪水痕跡から得た通水断面積は841m<sup>2</sup>であり、粗度係数を0.015m<sup>-1/3</sup>s程度とすると、ほぼ洪水痕跡から得た値に近い値となることがわかる。一方、図-10はこのときの桂地点での流量である。粗度係数を変化させても、断面形状の設定方法と同様、計算流量にはほとんど影響しないことがわかる。

なお、図-8で広幅矩形断面を仮定した場合の洪水ピーク時の水位が洪水痕跡とかなり近い値となっているが、偶然得られたものと考えられる。この場合の桂地点(評価地点2)での通水断面積は実測から得た値を下回り、断面平均流速は約5.1m/sと実際を大幅に上回っている。

## (5) 考察

以上をまとめると、以下が得られる。

- 1) 分布型流出モデルによる河川流量の再現性は高い。
- 2) 河川流量の計算値が、河道パラメータ(断面形状の設

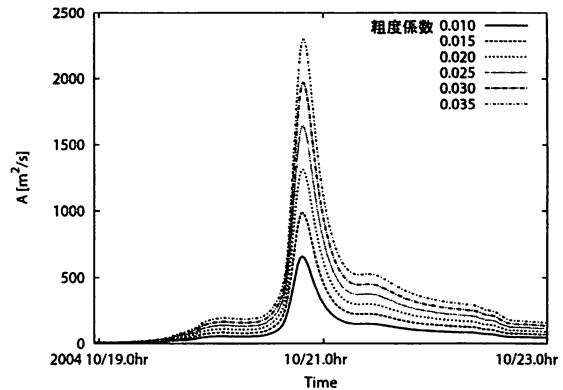


図-9 粗度係数が通水断面積の計算値に及ぼす影響(桂地点)

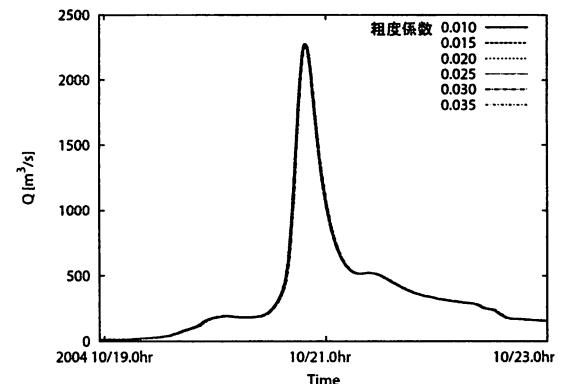


図-10 粗度係数が河川流量の計算値に及ぼす影響(桂地点)

定方法と粗度係数)から受ける影響は小さい。

3)一方で、通水断面積と水位は、河道パラメータの値の敏感に反応する。

粗度係数の変化が流量推定値には鈍く、水位には鋭敏に反応するという結果は山田ら<sup>14)15)</sup>の分析でも示されている。ここでは、対象河川区間で同じ粗度係数を設定し、また洪水期間中も粗度係数や河川の縦横断面形状が変わらないとして水位を計算したが、これらは洪水期間中に変動することが指摘されている。降雨の予測精度の向上と流出モデルの高度化により河川流量の予測精度は向上しているし、今後も向上させることが可能と考えるが、水位予測は極めて難しい課題であることがわかる。

## 5. 実時間河川水位予測手法の構成法について

上に示したように、水位予測を実現するためには従来の流出モデルや河道追跡モデルの改良だけでは限界があると考えられる。そこで、実時間で水位予測を実現することに焦点を当てて、水位予測手法の構成法を考察する。実時間水位予測に用いる流出モデルとしては、図-11に示すように、部分流域モデルの結合によって全体の流出系をモデル化することとする。部分流域モデルは、河道への流出を表現する流出モデルと河道流追跡モデルとから構成され、河道を通して部分流域モデルが相互に接続される。本研究で用いた流出モデルがこれに相当する。

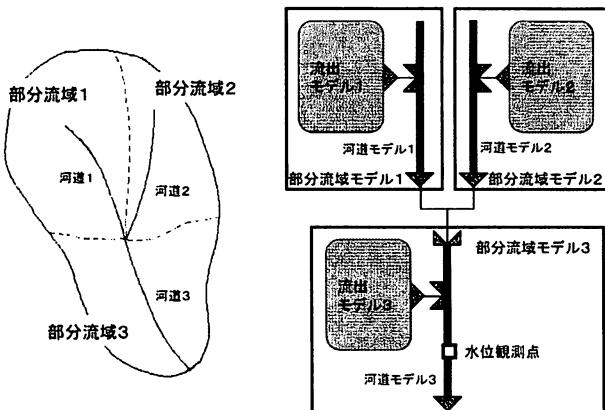


図-11 実時間河川水位予測手法の構成の枠組み

前章で示したように、河道パラメータの値の違いが河川流量の計算値に与える影響は小さい。したがって、水位予測が必要とされるような重要河川区間のみ、別途、より水位を適切に計算できるような河道流追跡モデルを用意し、その区間のみ水位を別モジュールで計算し直すことが考えられる。この場合、全体モデルで得られた河川流量を、対象とする河川区間の上下端の境界条件として与え、さらにこの区間に内に水位観測点を設けて実時間で水位を観測すれば、モデルパラメータ(粗度係数)を時々刻々、計算値と観測値とから同化することが可能となる。そこで、以下のような枠組みを考える。図-11を例に取って考える。

- 1) 全体モデルはここで示した淀川モデルのように水系全体を対象とするモデルとし、図-11 のすべての部分流域からの流量を予測対象とする。部分流域の河道区長は数 kmとする。本モデルでは3kmを基本としている。
  - 2) 図-11 の例で、河道区間3を水位予測の必要な重要区間とする。この河道区間3を対象として別途、水位計算モジュールを用意する。
  - 3) 河道区間3には水位観測点があるものとする。水位観測機器の設置はそれほど費用がかかるものではないので、存在しない場合は設置するものとする。
  - 4) 水位計算モジュールとしてはダイナミックウェーブモデルなどが考えられる。対象区間の上下端に全体モデルより与えられる流量と区間内の水位情報を用いて、その区間の粗度係数を同化する。つまり時々刻々、粗度係数を計算値と観測値に適合するように調整する。
  - 5) 現在時刻で粗度係数を同化したら、その値が数時間先までは続くと仮定し、上下端に与えられる予測流量を境界条件として、対象区間内の予測水位を求める。
  - 6) 全体の予測システムの中で時間を更新し、この手順を繰り返す。
- こうした枠組みでは、水位計算モジュールは重要な河川区間のみ適用することになるので、実時間計算に対して過大な計算負荷を与えることはない。現在、こうした考え方をもとに、筆者らが実施している予測システムの拡張を図っている。

謝辞：本研究は河川整備基金の補助を受けて行われました。また、2004年台風23号洪水に関するデータは国土交通省淀川河川事務所より提供していただきました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 立川康人, 佐山敬洋, 寶 鑑, 松浦秀起, 山崎友也, 山路昭彦, 道広有理：広域分布型物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用, 自然災害科学, 26-2, pp. 189-201, 2007.
- 2) 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 水文・水資源工学分野：淀川流域を対象とした実時間流出予測システム, [http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/yodogawa/yodo\\_prediction.html](http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/yodogawa/yodo_prediction.html), 最終更新日 2007年10月13日.
- 3) 日野幹雄：水文流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用, 土木学会論文集, 221, pp. 39-47, 1974.
- 4) 高棹琢馬, 椎葉充晴, 寶 鑑：集中型流出モデルの構成と流出予測手法, 京都大学防災研究所年報, 25(B2), pp. 221-243, 1982.
- 5) (財)北海道河川防災研究センター・研究所：「実時間洪水予測システム理論」解説書, 2004.
- 6) 佐山敬洋, 立川康人, 平田智行, 寶 鑑：バイアス補正を考慮するカルマンフィルタを導入した実時間流出予測, 京都大学防災研究所年報, 50B, pp. 1-14, 2007.
- 7) 市川 温, 村上将道, 立川康人, 椎葉充晴：流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発, 土木学会論文集, 691/II-57, pp. 43-52, 2001.
- 8) 椎葉充晴, 市川 温, 榊原哲由, 立川康人：河川流域地形の新しい数理表現形式, 土木学会論文集, 621/II-47, pp. 1-9, 1999.
- 9) 立川康人, 永谷 言, 寶 鑑：飽和不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, 48, pp. 7-12, 2004.
- 10) 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 水文・水資源工学分野：水文モデル構築システム OHyMoS, <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/ohy莫斯.html>, 最終更新日 2008年3月8日.
- 11) 市川 温：分布型流域流出系モデルの構成と集中化に関する研究, 京都大学博士論文, 2001.
- 12) 佐山敬洋, 立川康人, 寶 鑑, 市川 温：広域分布型流出予測システムの開発とダム群治水効果の評価, 土木学会論文集, 803/II-73, pp. 13-27, 2005.
- 13) 井田至春：広巾員水路の定常流一断面形の影響について, 土木学会論文集, 第69号別冊, (3-2), 土木学会, 1960.
- 14) 山田 正, 豊田康嗣：洪水におけるハイドログラフの特性とその形成過程に関する研究, 水工学論文集, 35, pp. 143-148, 1991.
- 15) 品川 守, 山田 正, 豊田康嗣：洪水ハイドログラフの形成過程と治水対策の効果に関する研究, 水文・水資源学会誌, 5(3), pp. 23-31, 1992.

(2008.4.3受付)