

水工学シリーズ 11-A-2

降雨流出予測の最新技術

京都大学大学院 工学研究科 准教授

立川 康人

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2011 年 8 月

降雨流出予測の最新技術

State-of-the-art Technology of Rainfall-Runoff Prediction

立 川 康 人
Yasuto TACHIKAWA

1. はじめに

洪水・渇水を予測し被害を受けないように備えるための基本的な技術が、降雨流出予測である。降雨流出予測には、豪雨・洪水の発生頻度とそれに対する発生強度を予測する技術と、豪雨・洪水が起こりつつあるときにこれらの現象をリアルタイムで予測する技術がある。前者の予測は河川計画を立案するための基本的な資料を提供することを目的とし、「計画予知」とよばれる。一方、後者の予測は水工施設の管理や水防・避難活動を迅速かつ効果的に行うためのリアルタイム予測情報を提供することを目的とし、「実時間予知」とよばれる。

「計画予知」と「実時間予知」を実現するためには、降雨流出現象を正しく理解することが基本となる。降雨流出現象を分析することを流出解析とよび、流出解析に用いる数理モデルを流出モデルという。降雨流出予測は、流出モデルの開発技術に降雨の観測・予測技術およびリアルタイムでの流出予測技術が組み合わさって、精度の高い予測が実現される。また、実用技術としての流出モデルは、モデル開発者以外の専門家がその中身を検証することを容易にするとともに、既存の流出モデルを応用してさらに発展させることができる「モデルの共有技術」も重要となる。

平成 23 年 1 月に日本学術会議に「河川流出モデル・基本高水評価検討等分科会」が設置され、平成 23 年 1 月から 6 月にかけて利根川水系の降雨流出モデルおよび基本高水に関する議論がなされた。ここで議論された内容は、降雨流出予測の技術開発を進める上で留意すべきことが多い。本稿では、ここで議論された内容を含めて、流出予測手法の発展と最新技術について解説する。まず、2. で降雨流出予測の目的と降雨流出モデルの分類および流出解析手法の発展を再確認する。3. で「河川流出モデル・基本高水評価検討等分科会」での議論の一端を紹介し、降雨流出予測に求められる技術と技術開発の方向性を議論する。4. では流出モデルを共有するための最新技術として、水理・水文モデリングシステム CommonMP を概説する。5. では分布型流出モデルを用いた実時間流出予測手法として、粒子フィルタを導入した実時間流出予測手法を示す。

2. 流出解析の目的と降雨流出モデルの分類¹⁾²⁾

2. 1 流出解析の目的と流出モデル

流出解析の目的は、降雨流出現象の物理機構を明らかにして、洪水や渇水を予測すること、流域環境や気候変化に伴う水循環の変化を予測することにある。具体的には以下がその目的となる。

- 1) 流出現象のより深い理解と流出モデルの開発：水文観測データの分析によって降雨流出現象を理解するとともに、流域内の水や物質の循環過程を時空間的に説明し予測する数理モデルを開発する。
- 2) 水工計画のための河川水位・流量の予測：洪水による災害を軽減・防止するためには、水工構造物（堤防、遊水地、ダムなど）の設置や強化を考え、その適切な規模や位置を提示する必要がある。その設計のための基本的な数値となる河川流量を予測する。

- 3) 実時間での河川水位・流量の予測：ダムなどの水工施設を効率よく稼働させるため、また水防活動や避難活動を効果的に実施するために、数時間先の河川水位・流量の予測値を時々刻々予測する。
- 4) 水資源予測（長期の流況予測）：河川水は農業用水、工業用水、都市用水など、水利用の主要な水源である。流域環境の変化や気候変化に伴って水資源がどのように変化するか、また河川からどの程度の水資源を期待することができるかを予測する。
- 5) 環境変化に伴う水循環の変化予測：流域環境の変化や社会状況の変化、気候変化によって水循環は大きく変化する。それらの変化によって生じる水量・水質の時空間変化を予測する。
- 6) 水文観測が十分でない流域の水文予測：洪水や水資源量を予測するためには水理・水文観測が必須となる。しかし、十分な水理・水文観測がなされておらず、今後ともその実施が難しい地域が存在する。それらの地域での水文予測情報を提供する。

2. 2 降雨流出モデルの分類と流出解析手法の発展

(1) 短期流出モデルと長期流出モデル

短期流出モデルとは、その言葉の通り数時間から数日の流出現象を再現・予測する流出モデルをいう。日本の河川流域を対象として考えると、短期流出モデルと洪水流出モデルとは同じ意味で用いられ、数日の河川流量を1時間単位またはそれよりも短い時間単位で再現・予測することが目的となる。この場合の流出モデルは、降雨から河川流量への変換過程、つまり斜面流出過程と河道網での流れのモデル化が流出モデルの主要部分となり、蒸発散過程はモデルに導入しないことが多い。

一方、数ヶ月から年単位の長期の流況を再現・予測することを目的とする長期流出モデルでは、蒸発散の過程を適切にモデルに反映させることが重要となる。大陸の大河川流域の河川流量を予測する場合は、数ヶ月単位で河川流量が変動するため、わが国の洪水流出モデルのように斜面流出過程と河道網流れだけから構成されるモデルではなく、すべての水文素過程を考慮した流出モデルが必要となる。

短期流出モデルは一つ一つの洪水を予測対象とするモデルであり、イベントモデルとなる。イベントモデルでは、計算開始時刻の初期状態やそれに関連するパラメータを流出モデルに与える必要がある。長期流出モデルは長期間の連続した水文現象を予測対象とするモデルであり、連続時間モデルとなる。

(2) 応答モデルと概念モデル、物理モデル

降雨流出モデルを例にとると、モデルへの入力は降雨強度、モデルからの出力は流出強度となる。応答モデルとはこの入出力データに着目し、時系列モデルなどを用いて降雨強度と河川流量との関係を定めようとするモデルである。単位図法はこの範疇に含まれる。降雨から流量への物理的な変換構造を陽に考慮しないことからブラックボックスモデルとよばれることもある。

概念モデルとは、降雨－流量の変換過程を概念的に表現するモデルである。代表的な概念モデルとしては、貯留関数法やタンクモデルがある。貯留関数法は流域を一つの貯水池と考え、貯留量と流出量との間の関係式と連続式を解いて流出量を算定する。我が国の多くの流域で適用例がある。木村の貯留関数法や有効降雨と貯留・流出機構を分離した貯留関数法、星の貯留関数法などがある。タンクモデルでは、側方と下方に流出孔を持つタンクを直列に連ねたタンク群を考え、一番上部の流出孔からの流出を地表面からの早い流出、一番下部のタンクからの流出を地下水からの遅い流出と考えて、それらの総和を河川流量とする。概念モデルは、過去の長期間の降雨と河川流量のデータが存在し、適切にモデルパラメータを決定することができれば、比較的精度よく河川流量を再現・予測することができる。また計算負荷が小さいために、実時間での予測にもしばしば用いられる。

○ 予測の期間から見た分類

- 短期流出モデル（洪水流出モデル）、イベントモデル
- 長期流出モデル、連続時間モデル

○ 降雨－流出の応答の考え方から見た分類

- 応答モデル（入出力の応答関係をもとに降雨流出の関係式を構成するモデル）
- 概念モデル（現象を概念的に捉え降雨流出の関係式を構成するモデル）
- 物理モデル（物理的な法則に基づいた基礎式から降雨流出の関係式を構成するモデル）

○ モデルの構成方法から見た分類

- 集中定数系モデル
- 分布定数系モデル

図 1：流出モデルの分類

応答モデルや概念モデルは、水文データが長期間に渡って存在し、将来も流域環境が変化しないことを前提とする。そのため土地利用の変化など流域環境が大きく変化した場合に洪水の発生の方や水循環がどのように変化するかといった問題や、水文観測が不十分な流域での流出予測に用いることは難しい。これに対応するためには、地形や土地利用、流域環境の変化を場の条件として与えることができる流出モデルが必要となる。つまり、流域環境の変化をモデルに反映させるために、実際の流域に即した場のモデル（地形や土地被覆、土壌を反映させた流れの場のモデル）を構成し、その上で水や物質の移動を物理的な機構のもとに表現するモデルが必要となる。キネマティックウェーブモデルを基本とした流出モデルは、雨水流の連続式と運動方程式を基礎式とする。粗度係数や土層厚などの物理的なパラメータを導入して雨水の流れを表現することができるため、土地利用の変化をそれらのパラメータの値の変化によりモデルに反映させることができる。こうしたモデルは物理モデルとよばれる。

(3) 集中定数系モデルと分布定数系モデル

ある対象地点の予測値が重要であり、流域内の雨水や物質の時間・空間的な動態を知る必要がない場合、対象地点上流の流域を単位として流出過程をまとめてモデル化することがしばしば行われる。流出モデルへの入力、流域平均の降水量であり、それが流域下端の河川流量に変換される過程がモデル化される。これらのモデルは一般的に時間を独立変数とする常微分方程式で記述され、集中定数系モデル（lumped model）とよばれる。

一方、雨水や物質が空間的にどのように移動し拡散するかを知ることが必要となる場合がある。福島第一原子力発電所の事故によって流域に放出された放射性核種が、雨水やそれに伴う土砂移動によってどのように拡散するかを時空間的に分析し予測することが重要な課題となっている。これを実現するためには、流域内の水文量や物質の時空間分布を再現・予測する物理モデルが必要となる。これらのモデルは通常、時間と空間を独立変数とする偏微分方程式で記述され、分布定数系モデル（distributed model）とよばれる。レーダー雨量計による降雨の詳細な時空間観測データや流域地形、土地利用の数値データを取り込むことによって、より精度の高い水文予測を志向するモデルである。

流域を分割してそれぞれのサブ流域を集中型流出モデルで表現し、それらを空間的に組み合わせることによっても、空間的な水文量の変動を考慮する流出モデルを構築することができる。ただし、この形式のモデルは通常、分布型流出モデルとはいわない。

3. 「河川流出モデル・基本高水評価検討等分科会」での議論と降雨流出予測の最新技術

日本学術会議に設置された「河川流出モデル・基本高水評価検討等分科会」では、利根川水系の降雨流出モデルと基本高水の算定について、1) 降雨流出モデルの計算手法、2) 降雨流出モデルの物理的妥当性、3) 予測の不確実性などを中心として議論がなされた³⁾。これらの議論に関連する降雨流出予測の技術として、特に流出モデルを共有する技術と予測の不確かさ（予測幅）を取り上げる。

3. 1 流出モデルに関する詳細な技術情報を共有することの重要性

流出モデルは河川計画の基本となる基本高水を定めるための中心的なツールである。その中身はモデル開発者以外の専門家が追計算・追検証して内容を確認できる必要がある。そのためには流出モデルの構築に関する技術文書が準備され、その中には流出モデルの基礎式、流域分割の方法、入力データの算定法、モデルパラメータ値の決定過程、数値計算手法、初期条件や境界条件の設定方法などが詳細に記述されねばならない。プレゼンテーション用のイメージを中心とした情報は多数作成されているが、モデル開発に関わっていない別の専門家が追計算・追検証することを念頭においた技術文書の作成は、十分になされていないように思われる。

具体例を挙げる。利根川水系の基本高水を定める流出モデルには、木村の貯留関数法が用いられている。一方で、国土交通省は分科会での討議を通じて別の貯留関数法を用いた新たな流出モデルを構築した。このときに両モデルで使われる貯留関数法の基礎式が技術文書として明確に示されないままに議論がなされ混乱が生じた。貯留関数法には異なるモデル構造を持つ複数の貯留関数モデルがある。また、異なる機能を持つモデルパラメータに同じ変数名が使われ、同じ名称でよばれることが多い。この場合、基礎式が示されなければ、どの貯留関数法を用いているかが分からない。

木村の貯留関数法は、以下のように表現される。流域面積を A 、流出域の面積を A_1 、浸透域の面積を A_2 として

$$A = A_1 + A_2$$

とする。 f_1 を一次流出率とよび、

$$f_1 = A_1/A_2 \quad (1)$$

である。時間を t 、流出域の貯留高を $s_1(t)$ 、浸透域の貯留高を $s_2(t)$ 、それぞれに対する流域平均の有効降雨強度を $r_{e1}(t)$ および $r_{e2}(t)$ 、それぞれからの直接流出高を $q_1(t)$ 、 $q_2(t)$ とするとそれぞれの連続式は、

$$\frac{ds_1}{dt} = r_{e1}(t - T_l) - q_1(t), \quad \frac{ds_2}{dt} = r_{e2}(t - T_l) - q_2(t) \quad (2)$$

である。 T_l は遅滞時間である。流出域と浸透域での貯留高と直接流出高の関係式は、

$$s_1(t) = Kq_1(t)^p, \quad s_2(t) = Kq_2(t)^p \quad (3)$$

とする。(1)式、(2)式は、 s_l を見かけの貯留量としてしばしば用いられる以下の式と同等であり、解釈のしやすさから(1)式、(2)式のように記述する。

$$\frac{ds_l}{dt} = r_e(t) - q(t + T_l), \quad s_l(t) = Kq(t + T_l)^p$$

$r_{e1}(t)$ 、 $r_{e2}(t)$ は、ティーセン法などから定まる流域平均降雨強度を $r(t)$ として、

$$r_{e1}(t) = r(t), \quad r_{e2}(t) = gr(t)$$

とする。 g は降り始め（計算開始時刻 t_0 ）からの $r(t)$ の積算値が R_{sa} より小さいとき、すなわち、

$$0 \leq \int_{t_0}^t r(\tau) d\tau < R_{sa} \text{ のとき } g = 0.0 \quad (4)$$

降り始めからの $r(t)$ の積算値が R_{sa} 以上となるとき、すなわち

$$R_{sa} \leq \int_{t_0}^t r(\tau) d\tau \text{ のとき } g = 1.0 \quad (5)$$

とする。流出量 $Q(t)$ は、流出域からの直接流出量と浸透域からの直接流出量および基底流量 $Q_b(t)$ の和として、次式で与えられる。

$$Q(t) = A_1 q_1(t) + A_2 q_2(t) + Q_b(t) \quad (6)$$

一方で、有効降雨の算定と貯留・流出機構を分離した貯留関数法もよく用いられる。この貯留関数法の構成は以下のようである。

$$\frac{ds}{dt} = r_e(t - T_l) - q(t), \quad s(t) = Kq(t)^p, \quad Q(t) = Aq(t) + Q_b(t) \quad (7)$$

ここで t は時間、 $s(t)$ は貯留高、 $r_e(t)$ は流域平均の有効降雨強度、 $q(t)$ は直接流出高、 $Q(t)$ は流出量、 $Q_b(t)$ は基底流量である。 A は流域面積、 T_l は遅滞時間、 K 、 p はモデルパラメータであり、流域固有の値と考える。流域平均の有効降雨強度 $r_e(t)$ は、ティーセン法から定まる流域平均降雨強度 $r(t)$ をもとに

$$r_e(t) = f(t)r(t) \quad (8)$$

とする。ここで $f(t)$ は降り始め（計算開始時刻 t_0 ）からの $r(t)$ の積算値が R_{sa} 以下のとき、すなわち

$$0 \leq \int_{t_0}^t r(\tau) d\tau < R_{sa} \text{ のとき } f(t) = f_1 \quad (9)$$

降り始めからの $r(t)$ の積算値が R_{sa} 以上となるとき、すなわち

$$R_{sa} \leq \int_{t_0}^t r(\tau) d\tau \text{ のとき } f(t) = 1.0 \quad (10)$$

とする。ここで f_1 は $0 < f_1 < 1$ とする有効降雨に関するパラメータであり、通常は対象流域で観測された一雨ごとの総雨量と直接流出高の関係から定める。(1)式の1次流出率とは意味合いが異なる。 R_{sa} は流域ごとに、また降雨ごとに变化すると考える有効降雨に関するパラメータであり、降雨すべてが直接流出に寄与する状態に遷移すると考えるまでの降雨強度の積算値とする。

(1)から(6)式で表現される木村の貯留関数法は2つの貯留量を持つが、(7)式から(10)式で表現される貯留関数法の貯留量は1つであり、両者のモデル構造は異なる。また、モデル構造と関連して両者の有効降雨の表現の仕方も異なる。しかしともに貯留関数法とよばれており、モデルパラメータは K 、 p 、 T_l 、 f_1 である。これらのモデルはモデルパラメータの値が同じであっても同じ計算結果にはならない。流出モデルの基礎式や入力データの算定法、モデルパラメータ値の決定過程、数値計算手法を理解して、どの流出モデルを対象としているかを共有しないと、流出モデルやパラメータ値の適否は議論できない。そのためには、同じ組織内やグループ内だけで通用する情報ではなく、この分野の専門家であれば誰もが同じ過程を踏んで追計算・追検証ができるような技術文書の作成が必要である。

3. 2 流出モデル自体を共有する技術の重要性

第三者が追計算できるような詳細な技術文書の作成は、流出モデルを共有する基本であるが、それだけでは不十分である。技術文書とともに、流出モデルを実現するコンピュータモデル自体を共有することができなければ、追計算することは容易ではない。複雑な流出モデルになればなるほど、技術文書にいかにか詳細に流出モデルの内容が記述されていても、それをコンピュータモデルとして実現して第三者による動作検証を実施することは極めて困難である。

このことは、コンピュータモデルとしての流出モデルを共有する技術がなければ、流出モデルの技術開発が開発者の中で閉じてしまっていて、より高度なシミュレーションモデルの構築が困難であることも意味している。一般に他の研究者や技術者が開発したコンピュータモデルを相互に組み合わせて利用することは容易ではない。通常、コンピュータモデルは開発者ごとに計算機環境やプログラミング言語が異なる。計算機プログラムの構成の仕方も異なることが多く、それらを相互に組み合わせて使おうとすると、ソースコードを理解して自分のシステムに合うようにソースコードを書き直さねばならない。その作業は非常に煩雑になり、現実的にはほとんど不可能である。このことは複雑なプログラムになればなるほど、開発者以外は修正が困難であり、他者による動作検証も不可能となることを意味する。これでは開発された資産が有効に使われず、複雑なシミュレーションモデルを効率よく開発することができない。

こうした問題点を克服するためには、流出モデルの開発ではなく、流出モデルの相互利用を可能とする水理・水文モデリングシステムの開発が欠かせない。モデリングシステムとはシミュレーションモデルそのものではなく、流出モデルや洪水追跡モデルなどの要素となる計算モデルを相互に接続して利用することを可能とするプラットフォームソフトウェアである。米国の MMS や欧州の OpenMI がその例であり、わが国では水文モデル構築システム OHyMoS (Object-oriented Hydrological Modeling System)⁴⁾がある。また、国土交通省国土技術政策総合研究所が中心となって新たに開発された共通プラットフォームソフトウェア CommonMP⁵⁾がある。「河川流出モデル・基本高水評価検討等分科会」では、利根川水系の現行の河川計画で用いられている流出モデルが CommonMP 上で実現され、分科会では現行モデル CommonMP 版を用いて再現計算を実施した。4. で CommonMP の概要を示す。

3. 3 予測の不確かさを定量的に示すことの重要性

予測には必ず不確実性が伴う。予測結果の不確実性の要因を明らかにし、その不確実性の要因がどのように予測結果の不確かさとなって現れ、その予測の幅がどうかを定量的に示すことが技術的に重要な課題となる。一般に予測の不確かさをもたらす要因は、以下のようである。

- 1) **入力データの不確かさ**：降雨流出予測では、特に、流出モデルへの入力となる降雨の推定値に含まれる不確かさを意味する。標高が高い地点での降雨観測密度が低いことによって流域平均雨量が過小に見積もられる可能性があること、流域平均雨量を求める際の内挿方法、レーダー観測情報から雨量強度に変換する際の推定誤差などが考えられる。
- 2) **モデル構造の不確かさ**：流域内部での土壤中の雨水の移動経路を十分に観測することが不可能であるために、流出モデルの構造が対象流域の水文現象を表現する上で不十分である可能性があることを意味する。
- 3) **モデルパラメータの同定の不確かさ**：モデルパラメータの同定が不十分なために、予測結果に不確かさが含まれることを意味する。降雨流出予測では、異なるパターンの降雨流出も同じパラメータ値で再現・予測できることが重要である。モデル構造の不確かさと密接に関連する。
- 4) **初期・境界条件の不確かさ**：流出予測計算の初期条件・境界条件の推定が不確かであることによって生じる予測の不確かさを意味する。イベントモデルでは、初期状態および初期状態に関連するモデルパラメータ（たとえば貯留関数モデルの R_{sa} ）の不確かさによって流出予測結果に不確かさが生じる。

これらの不確かさを定量的に示すことは容易ではなく、重要な研究課題となる。

「計画予知」ではかつて経験しなかった大きさの洪水を予測することを目的とする。上記の不確かさの要因に照らして考えると、大洪水を予測する場合は特に以下に留意する必要がある。

- 1) 既往洪水の時空間降雨観測密度はどのようなものであるか。また、計画降雨をどのように設定するか。
- 2) 既往洪水を再現できる流出モデルの構造が計画規模の洪水を予測するときにも有効であるか。

- 3) 既往洪水で定めた流出モデルのパラメータが計画規模の洪水を予測するときにも有効であるか。
- 4) 計画規模の洪水を予測するときの初期状態をどのように設定するか。

これまでに経験のない規模の洪水を推定することは、観測したことのあるデータを上回る外挿計算となる。そのため対象流域で実績のある流出モデルを用いることはもちろんであるが、加えて異なる流出モデルを複数用意し、複数の予測結果を用いて予測の幅を考える必要がある。外挿計算となるため、流出モデルは流出過程の物理プロセスを反映させたモデルが望ましいことは言うまでもない。またモデルパラメータの感度分析を実施し、パラメータの違いが予測結果に与える影響を分析してその違いによる予測幅を示すことが重要となる。

河川流量予測の不確かさを推定するために、「分科会」で実施した項目は以下のようであった。

- 1) **入力データの不確かさ**：流域平均雨量の見積もりは流出計算結果に大きな影響を及ぼす。そのため、流域平均雨量を求める際の降雨観測所密度の違いが流域平均雨量および流出計算結果に与える影響を分析した。
- 2) **モデル構造の不確かさ**：貯留関数法に加えて東京大学で開発された分布型流出モデル⁶⁾⁷⁾、京都大学で開発された分布型流出モデル⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾を適用し、それぞれのモデルによる河川流量の予測値の違いを確認した。
- 3) **モデルパラメータの同定の不確かさ**：貯留関数モデルを適用するに当たって、モデルパラメータ R_{sa} は初期状態に関連するパラメータと考えられるため、 R_{sa} が流量計算結果に与える影響を確認した。また、モデルパラメータ K 、 p の感度分析を実施した。
- 4) **初期・境界条件の不確かさ**：東京大学と京都大学の分布型流出モデルは連続計算モデルであり、計算期間の任意時刻の土壌水分状態を算定することができる。この情報を用いて異なる初期状態でのカスリーン台風による洪水の再現計算を実施した。具体的には、いくつかの年の6月から10月の連続降雨時系列データの中にカスリーン台風時の3日間の降雨データを差し込み、連続流出計算を実施して、異なる初期条件が計算結果に与える影響を分析した。

4. 水理・水文モデルの共通プラットフォーム CommonMP⁵⁾¹²⁾¹³⁾

4. 1 CommonMP の概要

CommonMP (Common Modeling Platform for water-material circulation analysis) は、国土交通省国土技術政策総合研究所が中心となって新たに開発した共通プラットフォームソフトウェア⁵⁾¹²⁾¹³⁾である。平成22年3月に version 1.0 が公開され、誰もがダウンロードして利用できるようになっている。この共通プラットフォームは Windows 上で動作するソフトウェアであり、水の流れや物質の移動を計算するための共通の基盤を提供する。図2は CommonMP の操作画面の一例であり、流出や河道流、氾濫などの要素となる計算モデルをコンピュータ画面上で相互に接続してシミュレーションモデルを構成し、流出計算を実施して、結果を画面上で確認することができる。

CommonMP は共通のルールのもとに要素モデルを接続し、要素モデル間のデータの授受を扱えるようにしているため、仕様に従って開発された要素モデルであれば、それらを組み合わせるだけで、複雑なシミュレーションモデルを効率よく構築することができる。公開された実行形式の要素モデルは容易に CommonMP 本体に組み込むことができるようになっており、それらを用いて水工シミュレーションモデルを構築するのであれば、プログラミングの知識を必要としない。既存の要素モデルだけで目的とする水工シミュレーションモデルができない場合は、新しく要素モデルを開発する環境も用意されている。

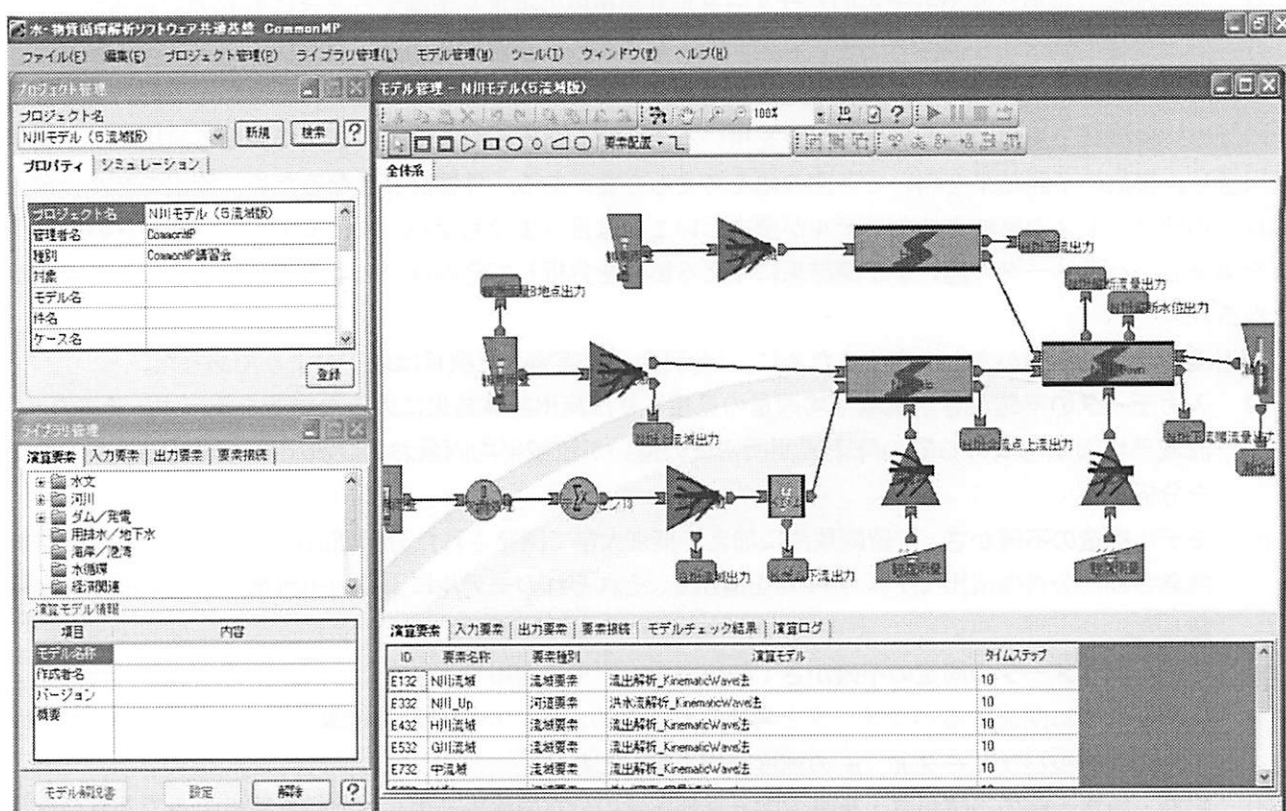


図2：CommonMP の操作画面

この共通プラットフォームを用いれば、他者が作成したシミュレーションモデルを自身の CommonMP 上で実行することができ、要素となる計算モデルの性能を相互に比較したり、要素モデルを交換したり追加したりすることが容易に実現できる。モデルパラメータの値や初期条件も画面上で変更することができ、様々な条件での予測シミュレーションを実施して、代替案を検討することができる。CommonMP には GIS 機能も備わっており、シミュレーション結果をわかりやすく表示することも工夫次第で可能である。わが国の社会基盤技術の基幹ソフトウェアとして定着し、政策決定に寄与することが期待される。

4. 2 CommonMP の機能の概要

CommonMP は、水の流れや物質の移動に関する現象、たとえば山腹斜面での雨水流出、河道での洪水流や土砂移動など、1つひとつを要素としてモデル化し、それらを相互に組み合わせて全体の水の流れや物質の移動を表現するシステムを提供する。図3に CommonMP によるモデリングの全体構造の模式図を示す。要素モデルは、斜面からの雨水流出や河道での洪水流、土砂移動など、自然現象の個々の水理・水文過程、ダムによる流量コントロールなどを表現する数値モデルである。要素モデルは既に開発されたものを容易に組み込んで利用することができる。もちろん、自分で新たに要素モデルを開発することもできる。これらの要素モデルを組み合わせて全体のシミュレーションモデルを構築し、モデルパラメータや初期条件を設定して実行できるようにするソフトウェアが CommonMP である。

CommonMP は Microsoft の .NET Framework を用いて開発されている。開発プログラミング言語は C# である。既存の要素モデルを利用して水理・水文シミュレーションモデルを構築し実行するならば、プログラミングの知識は必要ない。要素モデルごとに提供される DLL (Dynamic Link Library) を所定のフォルダに置くだけで、その要素モデルを利用することができるようになる。

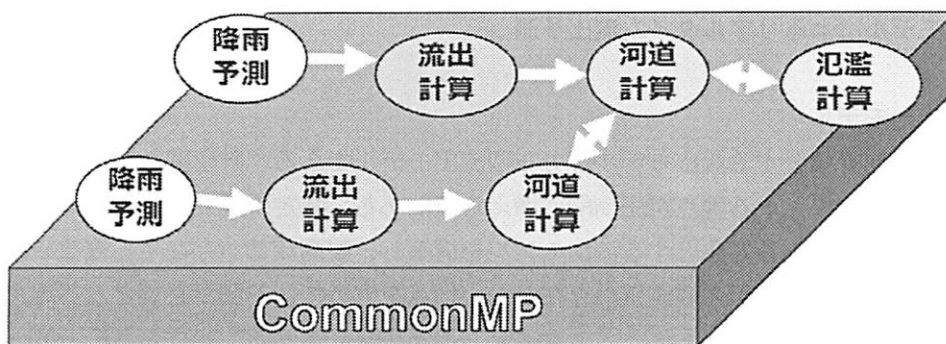


図 3 : CommonMP の操作画面

新しく要素モデルを開発してみようとする人は、CommonMP 上で動作するように準備されたクラスを継承することによって、新しい要素モデルのソースプログラムを容易に作成することができる。CommonMP には、新しい要素モデルの開発を補助するために、ひな形のソースプログラムやソースプログラムの生成を補助する開発環境、デバッグ環境が用意されている。新しく開発した要素モデルを CommonMP の全体システムに組み入れて、他の要素モデルと組み合わせることによって、シミュレーションモデルを拡張することができる。

4. 3 CommonMP を用いてできること

CommonMP は利用者の目的に応じて様々な使い方ができる。初めて水の流れや物質移動の計算機シミュレーションを学ぼうとする人は、既存の要素モデルを取得し、それを利用することによってシミュレーションモデルの構築の仕方や実行方法を学ぶことができる。CommonMP には、要素モデルを組み合わせる全体のシミュレーションモデルを構築する GUI 環境が準備されている。これを用いれば、シミュレーションモデルの構築、モデルパラメータの設定、初期条件の設定、シミュレーションの実行のすべてを GUI 環境で実施することができる。

実務者にとっても、既存の要素モデルを用いることで目的が達せられるならば、新たな要素モデルをプログラミングする必要はない。CommonMP 上で動作するように作成された流出モデルや洪水追跡モデルなどを用いれば、それらを組み合わせることで容易に洪水流出シミュレーションモデルを構築することができ、モデルパラメータや初期条件を変えて、洪水流出シミュレーションを実行することができる。また、複雑なシミュレーションモデルを比較的短時間で構築することができるため、専門家にとっても有用なシミュレーションツールとなる。貯水池や遊水地を設けた場合に、洪水流量がどのように変化するかを分析したい場合、それらの要素モデルを追加して全体のシミュレーションモデルを修正するだけで、様々な要求に対応する水工シミュレーションを実施することができる。コマンドラインでプログラムを実行する CUI 環境も備わっているため、バッチ処理によって大量のシミュレーションを自動的に実行することも可能である。

既存の要素モデルだけでは目的が達成できない場合は、新しく要素モデルを開発し追加することで、容易に全体のシミュレーションモデルを修正し拡張することができる。新しく要素モデルを開発することは、それほど難しいことではない。プログラミング言語 Visual C# と Microsoft Visual Studio の知識さえあれば、要素モデルの開発は容易である。CommonMP には開発を補助するツールも準備されている。また、CommonMP には他の人々が開発した要素モデルを容易に自分のシステムに組み込めるようにするライブラリ入出力機能が備わっている。さらに CommonMP は日本語だけでなく、さまざまな言語での利用を考慮して開発されています。このように、CommonMP は、利用する人の目的やシミュレーションモデルに対する習熟度に応じて、様々な使い方ができる。

5. 分布型流出モデルによるリアルタイム流出予測

5. 1 分布型流出モデル

あらゆる地点を予測対象とする流出モデルが分布型流出モデルである。貯留関数法などの集中型流出モデルと異なる点は、予測対象となる地点が圧倒的に増える点にある。特定の地点を対象として流出モデルを構成するのではなく、水系全体を対象とする流出モデルを構築し、観測流量が存在する複数観測地点での適合性を確認して、この予測モデルから観測値の存在しない地点を含めて、予測が必要となる地点の情報を取り出すという考え方をする。

もちろん、観測地点での予測流量が観測流量と適合するとしても、それ以外の地点での予測値が正しいことを保証することにはならない。しかし、こうした水系全体を対象とする分布型流出モデルを用いれば、リアルタイム観測情報を用いて空間分布するモデル状態量を時々刻々フィルタリングすることにより、観測情報が存在しない地点のモデル状態量も更新することができる。この効果により、観測の存在しない地点も流出の予測精度を向上させることが期待できる。

図4に基本的な分布型流出モデルの構成を示す。分布型流出モデルは20年以上も前から多くの研究者や技術者によって開発が進められてきた。流出過程の扱いの違いを除けば基本的には地形情報によって流れ方向を定め、それぞれの地点での流れを支配する水文過程をモデル化して雨水を追跡するという手順を取る(8)(9)(10)(11)。モデルパラメータの値は流出モデルの空間分解能に依存するため土地利用や土壌特性だけから決定できるわけではないが、観測データによるチューニングではなく、外的に得られる情報から決定することが志向される。

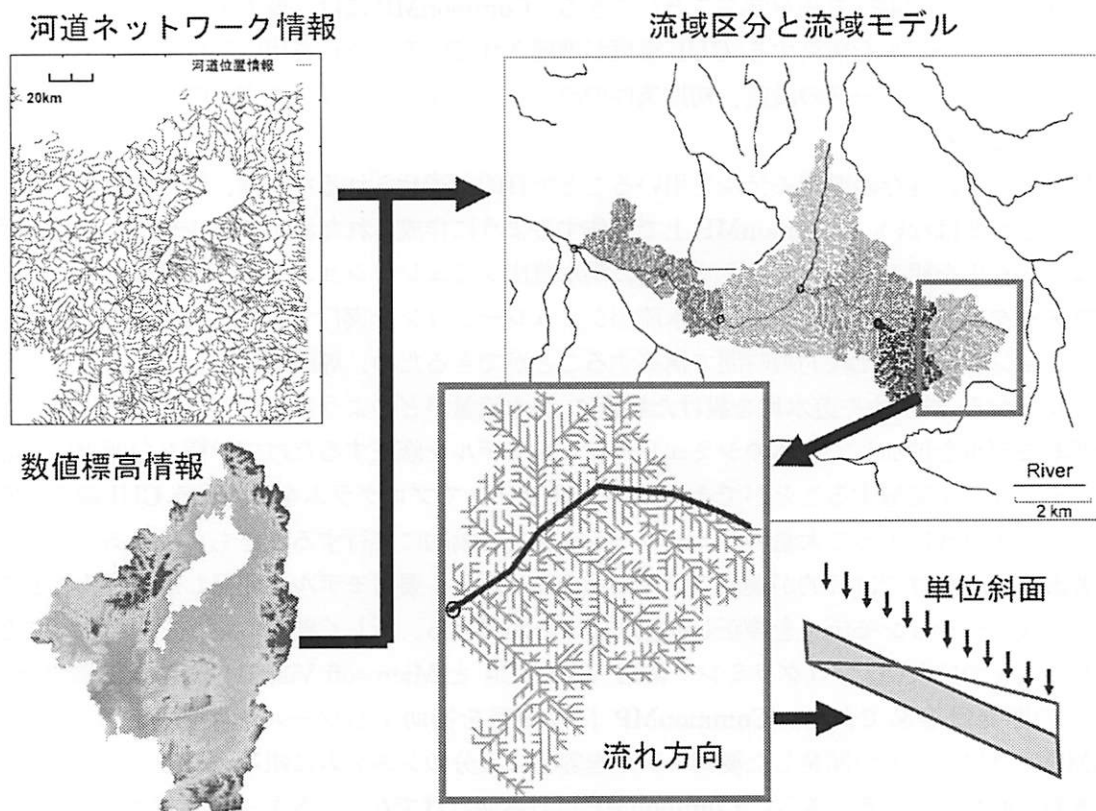


図4：数値地形情報とそれを利用した分布型流出モデルの構築

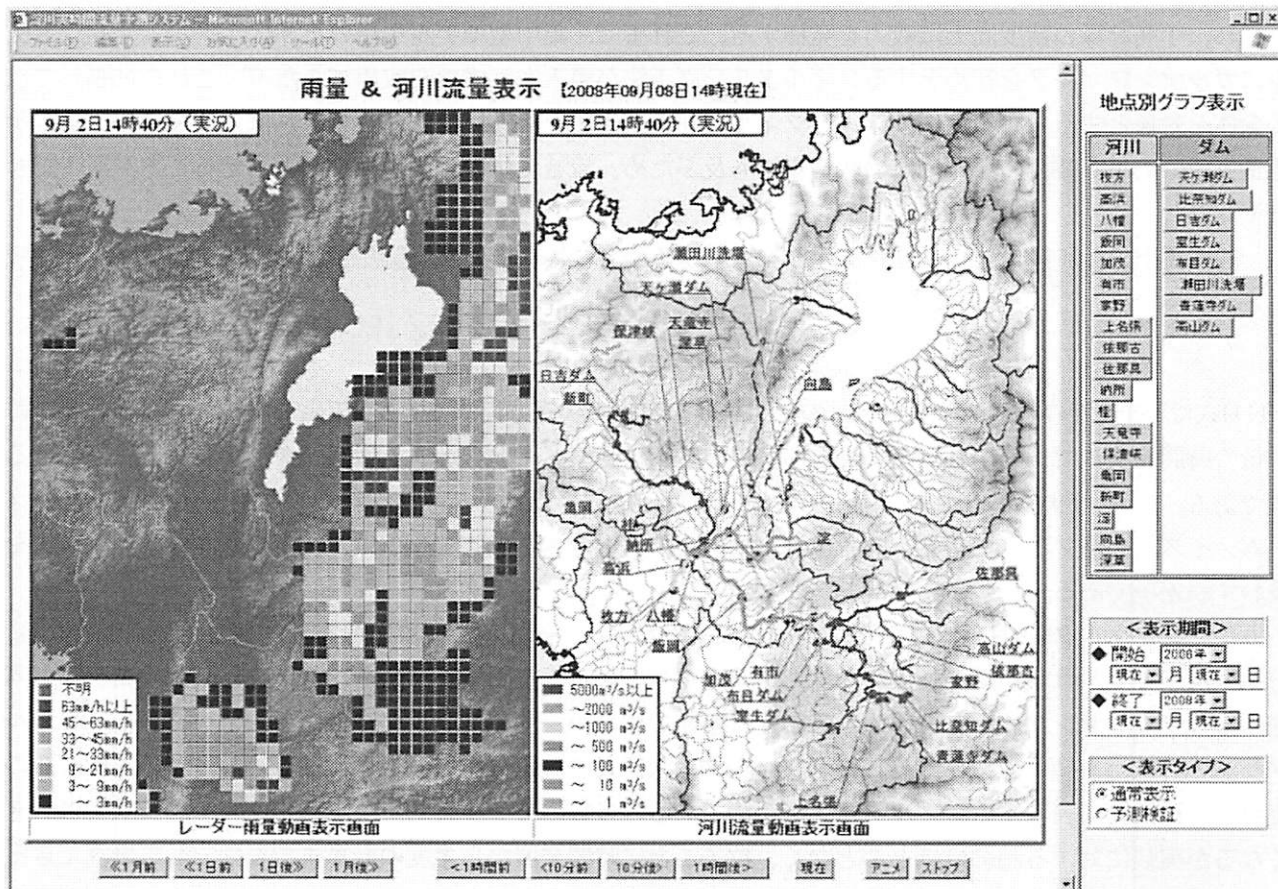


図5：淀川流域を対象としたリアルタイム分布型流出予測システム

こうした形式の分布型流出モデルはあらかじめ地形情報をもとに流下方向を決定するため、低平地の氾濫や浸水を扱う場合は、別途、氾濫モデルを用意してそれらを結合して用いる。ただし、分布型流出モデルと氾濫モデルとの結合は、これらのモデルの境界を明確に定めることができない場合は扱いが難しい。そこで最近では流出過程と浸水過程を一体的に扱うために、対象流域を覆う領域全体に平面2次元流れのモデルを適用して、降雨流出予測と浸水予測とを一体的に扱うモデルが開発されている¹⁴⁾。レーザープロファイラによる数mの地形情報を利用して、一体型モデルの都市域への展開が期待される。

5. 2 分布型流出モデルを用いたリアルタイム洪水予測の開発例

分布型流出モデルを実時間で稼働させれば、任意地点の実時間流出予測が可能となる。筆者が所属する研究室では、実時間で分布型流出モデルの再現性を確認することを目的とし、図5に示すような淀川流域(枚方上流域 7,281km²)を対象とするリアルタイム流出予測システムを開発して予測計算を実施してきた¹⁵⁾¹⁶⁾。こうした分布型流出モデルを対象とするフィルタリング手法(データ同化手法)の開発が、リアルタイム流出予測の精度を向上させるための基本的な技術となる。

5. 3 時々刻々の観測値を用いて予測値とともに予測の不確かさを示すフィルタリング手法

フィルタリング手法とは、時々刻々得られる観測情報(流出予測の場合は特に観測流量)を用いてシミュレーションモデルの状態量を時々刻々推定する手法である。状態量とは流出モデルを例にとれば貯留量や水深などモデルの状態を記述する変数である。フィルタリング手法の扱い方によってはモデルパラメータを状態量として、時々刻々推定の対象とすることもできる。推定し直された状態量は予測計算の初期値として用

いられ、予測計算の精度向上に威力を発揮する。これまで、集中型モデルを用いたリアルタイム予測システムにカルマンフィルタを初めとするフィルタリング手法が導入され成功を収めてきた¹⁷⁾。これを拡張して水系全体を対象とする分布型流出モデルにフィルタリング手法を組み込むことができれば、観測情報による状態量更新の効果が観測のない地点の状態量にも及ぶため、流域全体の予測精度を向上させることが期待できる¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾。

一般に流出モデルにフィルタリング手法を導入する場合、次式で表される状態空間型モデルを考える¹⁾²⁾¹⁷⁾。

$$x_t = f(x_{t-1}, \theta_t, w_t) \quad (11)$$

$$y_t = h(x_t, \eta_t, v_t) \quad (12)$$

(11)式は時刻 t での状態ベクトル x_t の時間発展を表わす状態方程式であり、流出モデルであれば水深や貯留量の時間発展式である。(12)式は観測方程式であり観測値ベクトル y_t と状態ベクトル x_t を関係付ける式である。 f, h は状態ベクトルに関する非線形関数、 θ_t, η_t はパラメータベクトルである。 w_t, v_t はシステムノイズと観測ノイズであり、前者は流出モデルの不十分さを表わす誤差項、後者は観測式の不確かさを表わす誤差項である。

カルマンフィルタでは(11)式、(12)式が線形式で表わされ、誤差項をガウス分布とすることが前提となる。分布型流出モデルは状態量が膨大な非線形・非ガウス型の状態空間型モデルとなるため、集中型モデルと同様の扱いでカルマンフィルタを導入することは容易ではない。別のフィルタリング手法として、粒子フィルタ²¹⁾²²⁾の導入が有望と考えられる。粒子フィルタは状態量の確率分布を多数の粒子（一つ一つのモデル）の実現値で近似的に表現するフィルタリング手法である。多数のモデルを同時に実行するため計算負荷は大きくなるが実装に対する制約はほとんどなく、粒子ごとに時間発展から尤度の計算までを独立して計算できるため、並列計算機を利用して効率的に予測計算を実現することができる。

5. 4 粒子フィルタの水位予測への適用例

非線形の状態空間モデルとしてダイナミックウェーブモデルを取り上げ、それに粒子フィルタを導入した実時間水位予測手法を示す²³⁾。

(1) 水位予測モデル

水位予測モデルにはダイナミックウェーブモデル

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q_L, \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial s} - i_o + I_f \right) = 0 \quad (13)$$

を用いる。 t は時間座標、 s は流下方向にとった空間座標、 A は通水断面積、 Q は流量、 g は重力加速度、 h は水深、 i_o は河床勾配、 I_f は摩擦損失勾配である。マンニングの抵抗則を用いて $I_f = n^2(Q/A)^2 R^{-4/3}$ とする。 R は径深である。また、対象河道区間における側方流入量は河川流量に比べて十分に小さいと考えゼロとする。河道横断面形状はできるだけ一般的な形状を表現するために広幅べき乗関数 $b = ah^p$ を採用した。 $a > 0$ 、 $p > 0$ は定数である。これらを解いて Q, A, h を得る。モデルパラメータは粗度係数 n と断面形状を決める a, p である。

(2) 粒子フィルタのアルゴリズム

粒子フィルタ^{21, 22)}は、非線形・非ガウス型のあらゆる状態空間型モデルに適用できるフィルタリング手法である。状態量の確率分布を多数のサンプル(粒子)の実現値で近似的に表現することが粒子フィルタの骨子であり、この点でアンサンブルカルマンフィルタと類似性がある。ただし、粒子フィルタは、状態量の事後分布を求める際にカルマンゲインを求めるのではなく、観測値によって定まるそれぞれの粒子の尤度（適合

度)を用いる。計算機システムへの実装が極めて容易であり、各粒子の時間発展から尤度の計算までを粒子ごとに独立して計算できるため、並列計算機を利用して効率的に予測計算を実現することができる。

(11)式(12)式で表される非線形・非ガウス型の状態空間型モデルを考える。一期先の状態 x_t の予測値の確率分布(事前分布)は

$$p(x_t|y_{1:t-1}) = \int p(x_t|x_{t-1})p(x_{t-1}|y_{1:t-1})dx_{t-1} \quad (14)$$

と表わされる。また、時刻 t までの観測ベクトル $y_{1:t}$ が得られた後、フィルタリングされた状態 x_t の確率分布(事後分布)は、ベイズの定理により

$$p(x_t|y_{1:t}) = \frac{p(y_t|x_t)p(x_t|y_{1:t-1})}{p(y_t|y_{1:t-1})} \quad (15)$$

である。粒子フィルタではこれらの条件付き確率分布を、その分布の実現値である独立の多数の粒子を用いて近似する。具体的には(14)式の事前分布を

$$p(x_t|y_{1:t-1}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t|t-1}^{(i)}) \quad (16)$$

と近似する。 N は粒子数、 $\delta(\cdot)$ はディラックのデルタ関数、 $x_{t|t-1}^{(i)}$ は時刻 t の i 番目の粒子の事前推定値である。これを(15)式に代入して、観測値 y_t を加えた後の事後分布が以下となるように粒子 $x_{t|t}^{(i)}$ を求める。

$$p(x_t|y_{1:t}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t|t}^{(i)}) \quad (17)$$

(16)式(17)式を表現する粒子 $x_{t|t-1}^{(i)}$ 、 $x_{t|t}^{(i)}$ は(11)式(12)式に従って以下の手順で求める。

- 1) 初期化：現在時刻を $t-1$ とする。 i 番目の粒子 ($i = 1, \dots, N$) についてフィルタリング後の状態量 $x_{t-1|t-1}^{(i)}$ が得られているとする(図6の第1列の粒子群)。
- 2) 予測：状態方程式(11)を用いて i 番目の粒子 ($i = 1, \dots, N$) の予測値 $x_{t|t-1}^{(i)}$ を求める(図6の第2列の粒子群)。これにより事前分布が(16)式より定まる。
- 3) フィルタリング：(15)式の $p(y_t|x_t)$ は状態 x_t のときに観測値 y_t を得る確率(尤度)であり、観測式(12)から定まる $R(y_t|x_{t|t-1}^{(i)})$ によって得られるとする。図6の第3列の粒子群の大きさは尤度の大小を表し、観測値に対する適合度が高い粒子ほど尤度が大きいことを表す。(15)式の分母の $p(y_t|y_{1:t-1})$ は

$$p(y_t|y_{1:t-1}) = \int R(y_t|x_t)p(x_t|y_{1:t-1})dx_t \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R(y_t|x_{t|t-1}^{(i)}) \quad (18)$$

であり、(16)式、(17)式を(15)式に代入すると、事後分布として

$$p(x_t|y_{1:t}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_t^{(i)} \delta(x_t - x_{t|t}^{(i)}) \quad (19)$$

が得られる。ここで $w_t^{(i)}$ は正規化した尤度である。

$$w_t^{(i)} = R(y_t|x_{t|t-1}^{(i)}) / \sum_{i=1}^N R(y_t|x_{t|t-1}^{(i)})$$

- 4) リサンプリング：正規化した尤度(重み) $w_t^{(i)}$ に比例する割合で $x_{t|t-1}^{(i)}$ を復元抽出し、抽出した粒子を $x_{t|t}^{(i)}$ とする(図6の第4列の粒子群)。抽出した粒子の合計は N 個とする。それぞれの粒子の重みはすべて $1/N$ となり、最終的に事後分布(17)式が得られる。また、リサンプリング後の各粒子の状態量あるいはパラメータにランダムな攪乱を与え、特定の粒子のみが選択されない工夫をする。

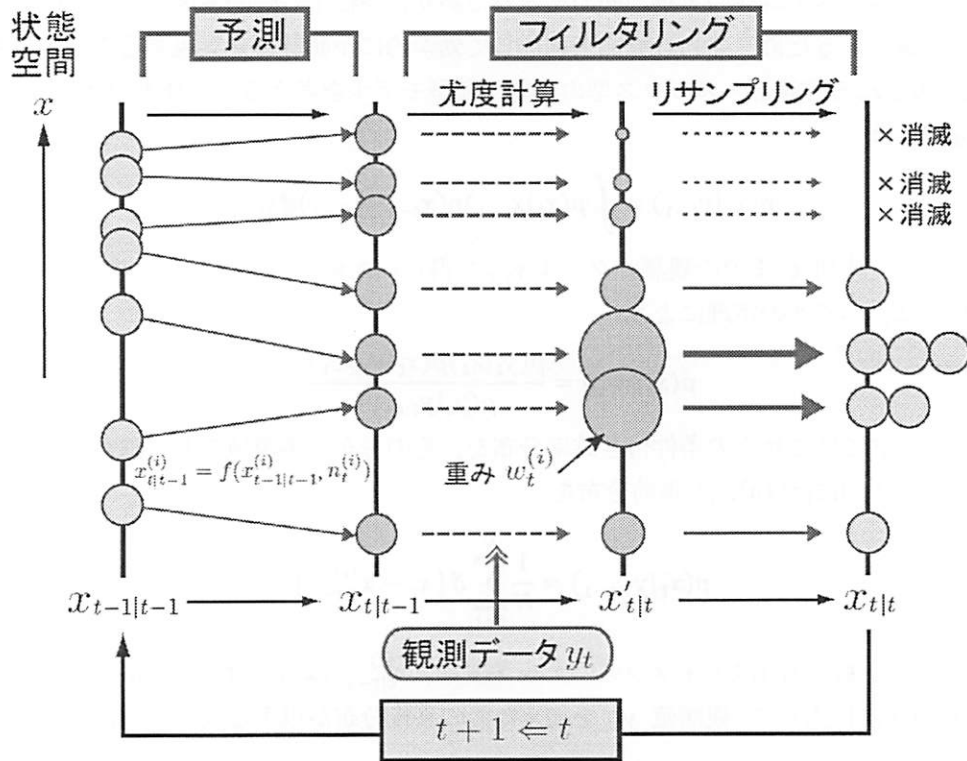


図6：粒子フィルタによる予測計算とフィルタリングの模式図²²⁾

5) 時間を更新して1)に戻る。

これにより x_t の最適推定値 $\hat{x}_t$ と推定誤差分散 $\hat{\sigma}_t^2$ は

$$\hat{x}_t = E[x_t] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{t|t}^{(i)} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_t^{(i)} x_{t|t-1}^{(i)}, \quad \hat{\sigma}_t^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_t^{(i)} (x_{t|t}^{(i)} - \hat{x}_t)^2$$

として求められる。予測幅を表わす 95%信頼幅なども $x_{t|t}^{(i)}$, ($i = 1, \dots, N$) から直接得ることができる。

(3) 水位予測への粒子フィルタの適用

前節で示したアルゴリズムに従って、ダイナミックウェーブモデルを状態方程式として粒子フィルタを適用する。以下では設定条件を具体的に示す。

a) 粒子化の対象と初期設定

粒子フィルタでは、状態量やパラメータ、初期・境界条件に異なる値を設定した状態方程式を多数構成し、それらを同時に進行させて時々刻々の観測情報を予測システムに組み込む。ここでは、予測水位に大きな影響を与える粗度係数 n を粒子化の対象とする。また、河道区間の上端でダイナミックウェーブモデルに与える流量（流出モデルによる予測値）が誤差を含むとし、それに乗ずる係数 r_q を考えて粒子化の対象とする。 n 、 r_q の初期分布は正規分布に従って独立に発生させ、 $n \sim N(0.035, 0.005^2)$ 、 $r_q \sim N(1.0, 0.15^2)$ とした。 n の単位は $m^{-1/3}s$ 、 r_q は無次元である。また、 n については $0.015 < n < 0.063$ 、 r_q については $0.4 < r_q < 1.6$ となるように値を制限した。

b) 粒子数

粒子数（ダイナミックウェーブモデルの個数）が予測結果に及ぼす効果を分析するため、粒子数が 50、100、300、500、1000、3000 個の場合の最適推定値と予測誤差分散を比較した。100 個以下では予測シミュレーションごとに結果が大きくばらつき、良い推定結果は得られなかった。少なくとも 300 個は必要と考えられる。1000 個以上での予測結果に大きな違いが見られなかったため、粒子数を 1000 個とした。

c) 予測計算

河道区間上端に分布型流出モデル^{10),15)}によって予測される流量、下端には水位と流量の関係式を与えて、(12)式を陽形式差分法²⁴⁾によって解く。次節で実施する差分計算では差分時間間隔、空間間隔を 30s、512m として、1,000 個のダイナミックウェーブモデルを同時に解く。これが状態方程式(11)を解くことに相当する。粒子フィルタを適用する場合、時刻 t の状態量 x_t を時刻 $t-1$ の状態量 x_{t-1} で陽に記述する必要はない。シミュレーションモデルによって x_{t-1} から x_t が定まればよい。(11)式の θ_t は粗度係数 n と断面形状を表わす a, p である。システムノイズはここでは考えない。

d) 尤度関数の設定

水位観測値は 1 時間ごとに得られるので、1 時間ごとにフィルタリングを実施する。観測式(12)から定まる尤度関数を正規分布の確率密度関数とし、

$$R(y_t | x_{t|t-1}^{(i)}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{(h_{t,cal}^{(i)} - h_{t,obs})^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (20)$$

とする。 $R(y_t | x_{t|t-1}^{(i)})$ は粒子 $x_{t|t-1}^{(i)}$ の尤度、 $h_{t,cal}^{(i)}$ は時刻 t の i 番目の粒子の水深の予測値、 $h_{t,obs}$ は観測値である。 σ_y は観測水深の標準偏差で、観測水位の 10% 程度の観測誤差があるとして $\sigma_y = 0.1h_{t,obs}$ とした。

e) リサンプリング手法

リサンプリングの目的は、重み $w_t^{(i)}$ を持つ粒子 $x_{t|t-1}^{(i)}$ によって表現される分布関数を、重みが等しい粒子によって表現できるように粒子を選び直す(復元抽出すること)にある。選び直された粒子が $x_{t|t}^{(i)}$ であり、ランダムサンプリングや層化抽出²¹⁾、ドント方式などがある。ドント方式によるリサンプリング手順を説明する。粒子の重み $w_t^{(i)}$ が計算された後、以下により $d_j^{(i)}$ を求める。

$$d_j^{(i)} = w_t^{(i)} / (m_j^{(i)} + 1) \quad (21)$$

$m_j^{(i)}$ は、最初 0 個として、粒子 i に j 回目までに抽出された個数の総和である。 $j = 1, \dots, N$ の順に $d_j^{(i)}$ が最大となる粒子 i に対して配分率 $m_j^{(i)}$ を一つ増やす。これを粒子の総数 N 回分繰り返せば復元抽出が完了する。 $d_j^{(i)}$ の値が等しくなる場合は番号の若い粒子を抽出することにした。これらの 3 つのリサンプリング手法が予測結果に与える違いを見たところ、最適推定値に違いがなく、粒子の分布はリサンプリング手法よりも尤度関数の設定が大きく影響するという結果であった。そこで計算負荷が小さいドント方式を採用した。

f) 粒子の多様性の確保

特定の粒子の重みが大きくなって粒子のパターンが固定化してしまうと、状況の変化に適応できなくなり予測の精度が低下する。これに対処するために、リサンプリング後に各粒子のパラメータや状態量に攪乱を与える。攪乱の与え方には様々な手法が考えられるが、ここでは正規乱数を発生させて、 n と r_q に対して

$$n_t = n_{t-1} + \xi_n, \quad r_{q,t} = r_{q,t-1} + \xi_q \quad (22)$$

とする。 $\xi_n \sim N(0, \sigma_n^2)$ 、 $\xi_q \sim N(0, \sigma_r^2)$ とし $\sigma_n = 0.0005$ 、 $\sigma_r = 0.003$ とした。計算を安定させるために $n_t < 0.015$ となった場合は、再度発生させる。同様に $0.4 < r_q < 1.6$ となるように範囲を制限する。

上記の方法は粒子フィルタを適用する場合に一般的に用いられる手法であるが、水理計算を実施する上ではこの方法だけでは不十分な場合がある。粒子の多様なパターンを確保するためには、 σ_n や σ_r の値をある程度の大きさに設定する必要があるが、特に粗度係数に攪乱を加える場合、前の時刻で設定された粗度係数の値と極端に異なる値が設定されると計算が不安定になることがある。これを防ぐためには分散の値を小さく設定すればよいが、その値が小さすぎると、急激な増水がある場合にその変化に追従できなくなる可能性がある。そこで分散の値を押さえつつ粒子の多様性を確保するために、重みの値をゼロとしない特別な粒子を複数用意し、すべての計算期間を通してそれらの値を保持することを考える。

具体的には、予測計算の初期時刻に正規乱数によってパラメータ値を設定する一般の粒子とは別に、取得パラメータ値の範囲をカバーするように数種類の特別な粒子を設定する。たとえば粗度係数であれば、

0.020 から 0.065 まで $0.005\text{m}^{1/3}\text{s}$ の間隔で 10 個の粒子を設定することなどを考える。これらの特別な粒子も、一般の粒子とともに予測計算を行い尤度に応じて重みを求めてリサンプリングする。ただし、重みの大小に関わらず一つの粒子はリサンプリング後も攪乱を加えずに、初期に設定したパラメータの値を保持するようにする。これによって、パラメータの値を攪乱するために大きな分散を与えることなく、粒子の多様性を保持することができる。

g) 計算機環境

予測から尤度の計算までは、それぞれの粒子に対する計算は独立しているため計算を並列化できる。粒子数が大きい場合は並列計算の効果が大きい。ここでは 8 core PC 上の Linux 環境(CentOS 5.3)で OpenMP を使い、g++ version 4.4 でコンパイルした計算機プログラムを用いた。

(4) 適用結果と考察

淀川水系に属する桂川流域 ($1,100\text{km}^2$ 、図 7) を対象として分布型流出モデル¹⁰⁾¹⁵⁾による流出計算を行い対象河道区間の流量を計算する。ダイナミックウェーブモデルを適用する河道区間は、天竜寺地点から納所地点下流までの約 16km の区間である。この区間には 4 ヶ所(天竜寺、桂、羽束師、納所)に水位観測所がある。対象洪水は最近の 10 年間で最も大きい 2004 年 10 月の台風 23 号による洪水とした。この洪水は羽束師水位観測所周辺から上流数 km に渡って洪水痕跡が計画高水位を上回る洪水であった。図 7 右上に対象河道区間上端の天竜寺地点での流量の観測値と流出モデルによる計算値を示す。流量の計算値の再現性はよい。この計算流量をダイナミックウェーブモデルの上端での境界条件とする。図 7 右下はこのときの羽束師地点 (図 7 の評価地点 5) での観測水位とフィルタリングをしないオフライン計算での水位である。オフライン計算では、粗度係数 n はこの区間で従来から用いられている $0.035\text{m}^{1/3}\text{s}$ とし、流量の再現性は高いので上端流入量に対する係数は $r_q = 1.0$ としたが、ピーク時の予測水位は 2m 近く小さかった。

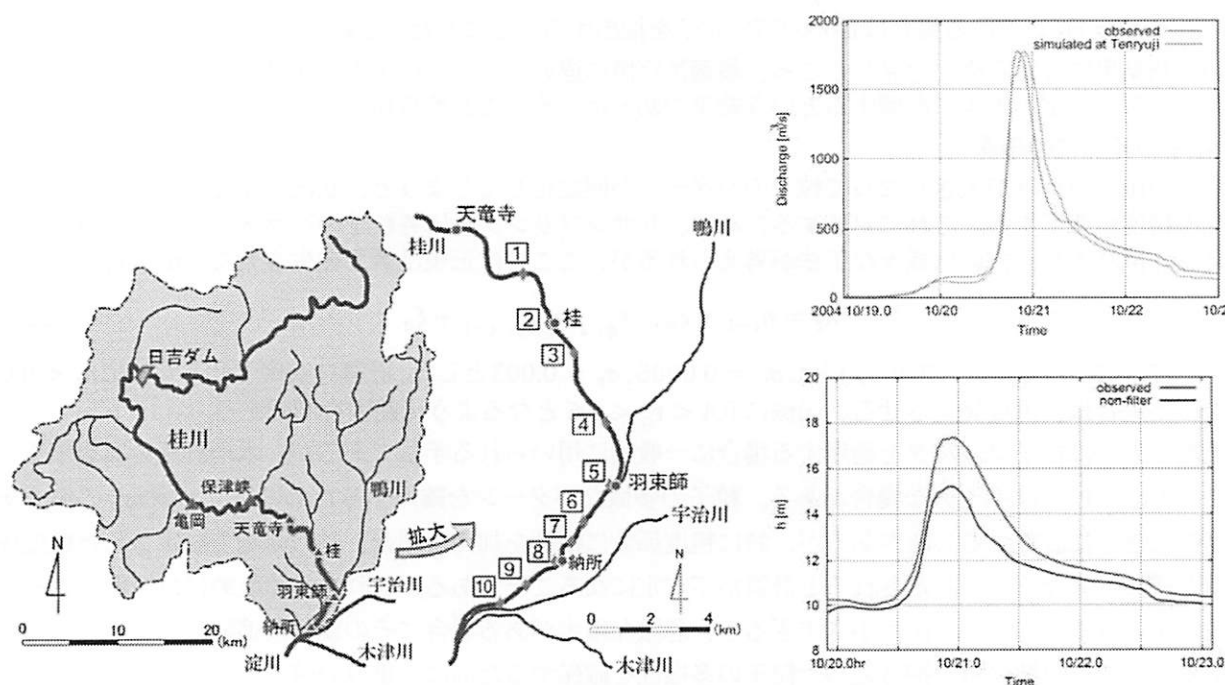


図 7：桂川流域と水位の比較地点と観測値および計算値。(右上) 流量（天龍寺地点）(右下) 羽束師地点。

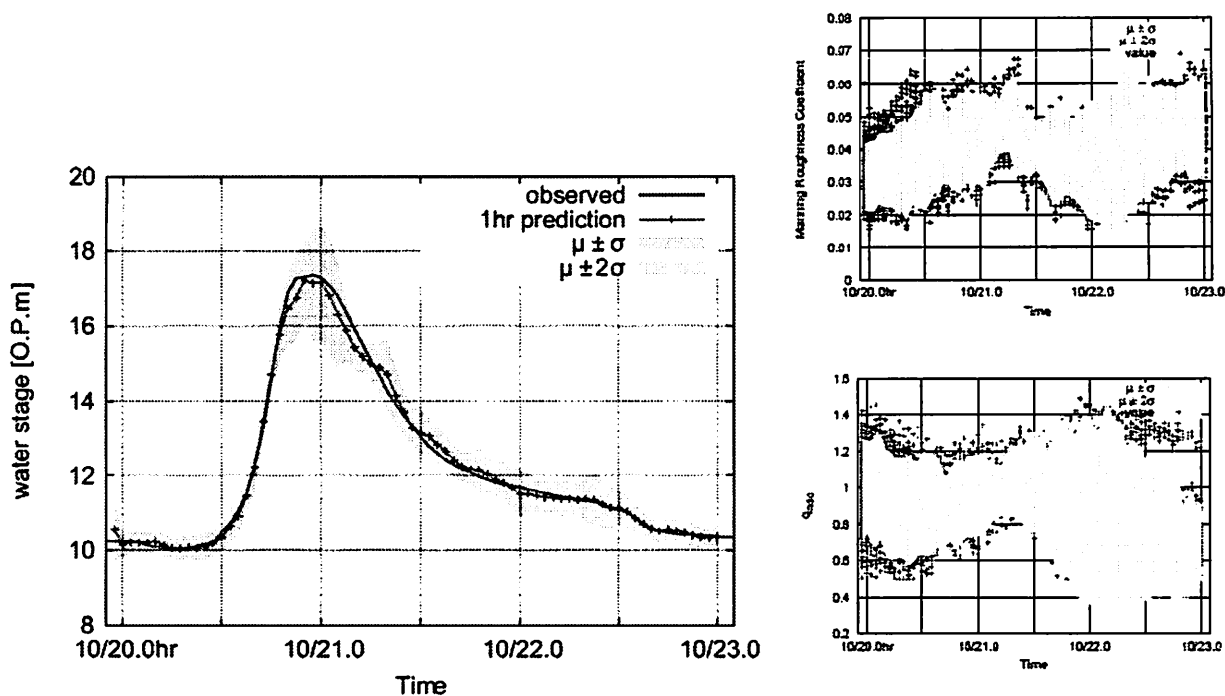


図8：羽束師地点の1時間先の予測水位とパラメータの時間変化。(右上) 推定された粗度係数 n の時間推移。(右下) 推定された流入係数 r_q の時間推移。

これに対して図8は前章で示した計算条件のもとに、羽束師地点の観測水位を用いてフィルタリングした場合の1時間先の予測水位である。この場合は5.4(3)で述べた特別な粒子は設定せず、一般の粒子のみでフィルタを構成した。図8右に各粒子(モデル)に設定した n と r_q の時間変化を示す。プロットした点がそれらの値であり、その上に 1σ と 2σ の範囲を示している。粗度係数 n に関して水位上昇時により大きな値を持つ粒子が選択されている。羽束師地点周辺ではこの洪水のピーク時、水位が計画高水位を超え高水敷の上まで水位が上がった箇所があり、洪水が高水敷を流れるにつれて粗度が時々刻々増加することを表現したと考えられる。また、 r_q は図7右上の観測流量と計算流量の違いを修正するように $r_q = 1.0$ の周りに変化している。適合するパラメータを持つ粒子が逐次、復元抽出されており、水位の予測値はオフライン計算値を大きく改善している。

同様のフィルタリング・予測計算を桂地点(図7の評価地点2)の観測水位を用いて行ったら、羽束師地点と同じ方法を採用した場合は、十分な予測結果が得られなかった。これは桂観測地点の直下流に堰があり、洪水時に複雑な流れが生じたためと考えられる。そこで河道横断面形を設定するパラメータ a 、 p も粒子化の対象とし、さらに5.4(3)で示した特別な粒子を用意して、より多様な粒子を設定した。特別な粒子は n, r_q, a, p の値の種類をそれぞれ5, 1, 4, 4種とし、これらの組み合わせで合計80個を設定した。これらに加えて一般の粒子を1,000個設定し合計の粒子数を1,080個とした。この結果、図9に示すように観測値と適合する予測結果を得ることができた。図9右は、初期に設定した80個の特別な粒子が復元抽出された経過である。右上図の粗度係数の場合、0.02から0.06まで5種、それぞれの粗度係数を持つ粒子について $1 \times 4 \times 4 = 16$ 個、合計80個の特別な粒子は常に存在する。これら以外に復元抽出された同じ値を持つ粒子で(22)式により攪乱された粒子が、特別な粒子の周りに分布している。こうした粒子の多様性は、一般の粒子のパラメータ値に攪乱を与えるだけでは実現できない。

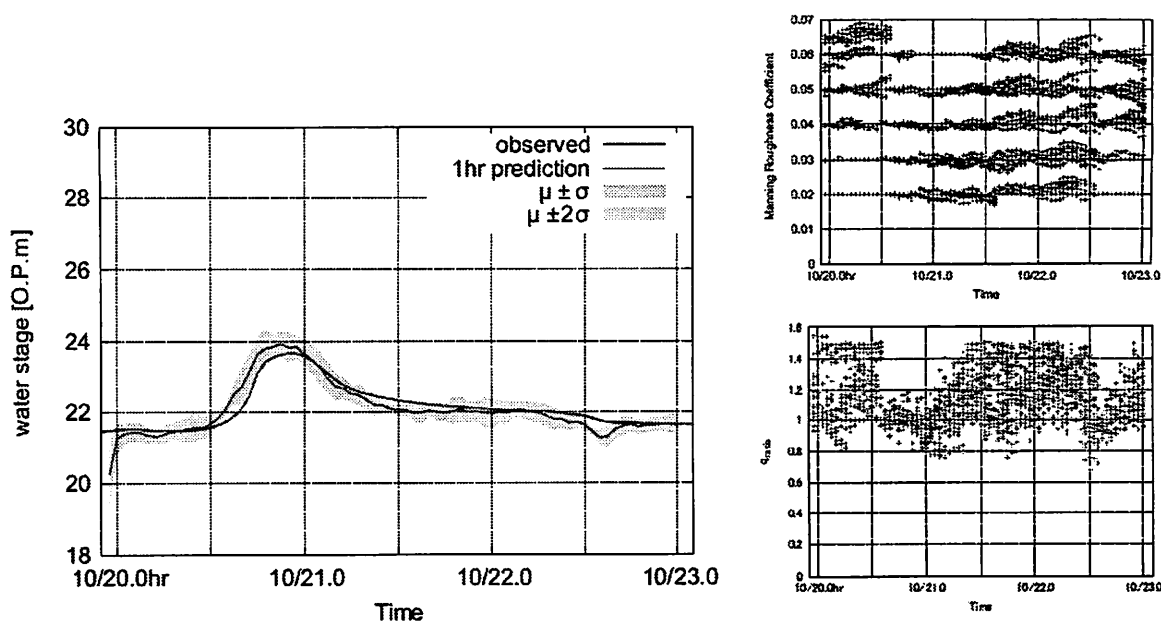


図 9 : (左) 桂地点での 1 時間先の予測水位とパラメータの時間変化。(右上) 推定された粗度係数 n の時間推移。(右下) 推定された流入係数 r_q の時間推移。

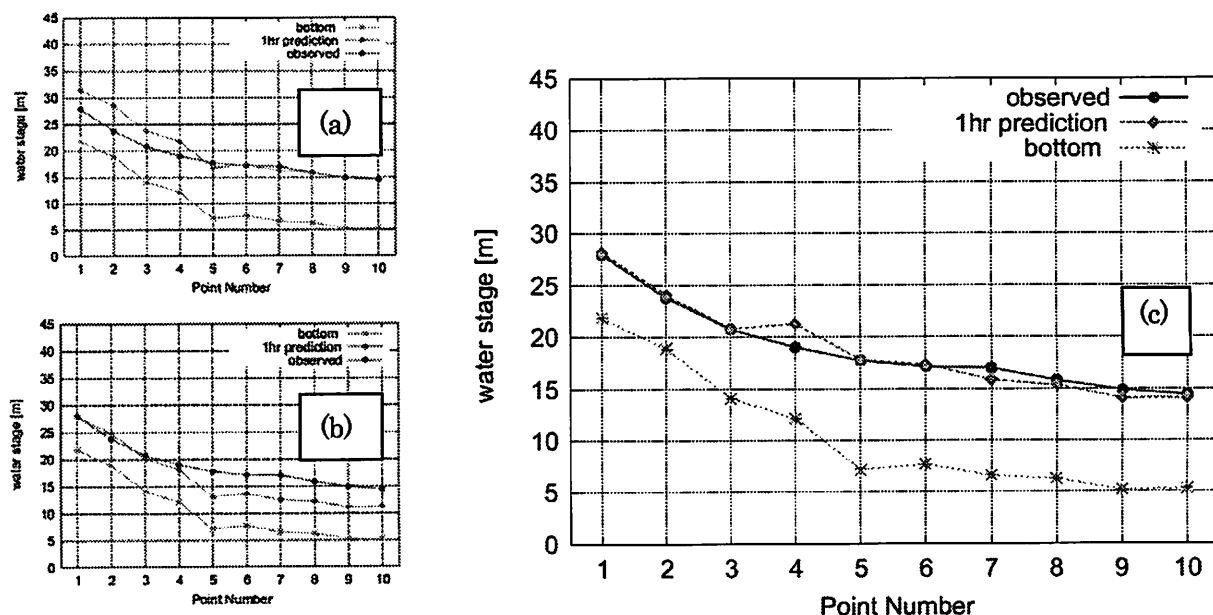


図 10 : (a) 1 時間先の予測計算での最大水位と痕跡水位の比較。(a) 羽束師地点 (評価地点 5) の水位を用いた場合。(b) 桂地点 (評価地点 2) の水位を用いた場合。(c) 重み付き平均によって求めた予測最大水位と痕跡水位。

次に観測のない地点での水位の予測結果を評価するために、洪水痕跡水位と 1 時間先の予測計算での最大水位とを比較した。図 10 にその結果を示す。横軸の番号は図 7 の四角囲みで示す評価地点の番号である。(a) は羽束師地点 (評価地点 5) の観測水位でフィルタリングした場合、(b) は桂地点 (評価地点 2) の観測水位でフィルタリングした場合である。どちらも評価地点の周辺数 km の予測結果は妥当だが、それ以外の区間の予測は十分ではない。これは観測地点の水位に適合するように選択されたモデルが他地点での水位を適

切に予測できるとは限らないためである。これに対処するためにパラメータ値の違いだけでなく、それが空間的に分布するパターンまで考えて異なる粒子を設定することが考えられる。しかしパラメータの空間分布まで考えてその時間変化を得るためには膨大な数の粒子を設定する必要がある、実時間予測には向かない可能性がある。

そこで別の手法を考える。パラメータ値の空間分布を考慮しなくても観測地点周辺の水位は適切に予測できるので、観測地点ごとに独立にフィルタリング・予測計算を行い、任意地点から観測地点までの距離に応じた重み付き平均値を求めてその地点の予測水位を得ることを考えた。図10右図は羽東師地点と桂地点の予測水位を用いて評価地点の最大水位を予測した結果であり、全区間で1時間先予測最大水位と痕跡水位がよく対応している。計算負荷は観測所の個数倍増えるだけである。

6. まとめと今後の展開

流出予測の不確かさはシミュレーションモデルへの入力データの不確かさ、モデルの構造の不確かさ、モデルパラメータ同定の不十分さ、初期条件や境界条件の不確かさに起因する。これらの不確かさを定量的に把握することが重要である。その不確かさを定量的に評価し、予測の幅を示して、それらを減じる努力を継続することが、実用技術としての降雨流出予測の精度向上と信頼性の向上に結び付く。そのためには観測データを蓄積して対象流域の水文過程を理解し、流出モデルがそのプロセスを適切に表現しているかを常に確認する必要がある。XバンドMPレーダーの運用により、降雨観測の精度が格段に向上している。新しいレーダー雨量データの精度向上による入力の不確かさの減少は、モデル構造の不確かさやパラメータ同定の不確かさの減少に大きく寄与することが期待される。

CommonMPはこれまでにない画期的なソフトウェアである。このシステムを用いて流出モデルが構築されれば、モデル開発者以外の技術者や研究者でも容易に流出モデルの修正や改良が可能となる。そのため、短期間で高度な水工シミュレーションソフトウェアを構築することができる。また、このシステムを用いることにより、モデル開発者以外の第三者による流出モデルの追計算・追検証が容易に実施できる環境が整う。流出計算の透明性が高まり、流出計算結果が信頼されるものとなる。CommonMP上で動作する要素モデルが多数整備され、多くの技術者や研究者の支持を得て、わが国の社会基盤技術の基幹ソフトウェアとして定着することが期待される。CommonMPには多言語に対応する機能も備わっているので、海外でも広く利用されるよう日本語以外の言語のマニュアルや個々の要素モデルの多言語化を進めねばならない。

実時間流出予測では、時々刻々得られる観測情報を用いて状態量や初期条件・境界条件、あるいはモデルパラメータ値を設定し直す作業を繰り返すことで、予測モデルの構造の不十分さやパラメータ同定の不十分さを補いつつ、精度の高い予測を得ようとする。これまで実現できなかった分布型流出モデルに対するフィルタリング手法は、並列計算機の利用と粒子フィルタの導入によって新たな局面を迎えている。

参考文献

- 1) 池淵周一, 椎葉充晴, 宝 馨, 立川康人: エース水文学, 朝倉書店, 2006年2月。
- 2) 椎葉充晴, 立川康人, 市川 温: 例題で学ぶ水文学, 森北出版, 2010年5月。
- 3) 日本学会会議 土木工学・建築学委員会 河川流出モデル・基本高水評価検討等分科会 議事次第,
<http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/bunya/doboku/giji-kihontakamizu.html>
- 4) 京都大学大学院工学研科 社会基盤工学専攻 水文・水資源学分野: OHyMoS ホームページ,
<http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/ohyomos/>
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所: CommonMP ホームページ, <http://framework.nilim.go.jp/>
- 6) Wang, L., Koike, T., Yang, K., Jackson, T. J., Bindlish, R. and Yang, D.: Development of a distributed

- biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99), J. Geophys. Res.-Atmos., 114, D08107, doi:10.1029/2008JD010800, 2009.
- 7) Wang, L., T. Koike, K. Yang, and P. Yeh (2009), Assessment of a distributed biosphere hydrological model against streamflows and MODIS land surface temperature in the upper Tone River Basin, Journal of Hydrology, 377, pp. 21-34, 2009.
 - 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値表現形式, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 1-9, 1999.
 - 9) 市川温, 村上将道, 立川康人, 椎葉充晴, 流域地形の新たな数値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, No. 691/II-57, pp. 43-52, 2001.
 - 10) 佐山敬洋, 立川康人, 寶 馨, 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, No. 803/II-73, pp. 13-27, 2005.
 - 11) S. Kim, Y. Tachikawa, E. Nakakita, K. Yorozu and M. Shiiba: Climate Change Impact on River Flow of the Tone River basin, Japan, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 55, pp. S_85-S_90, 2011.
 - 12) 椎葉充晴, 立川康人 編: CommonMP 入門, 技報堂出版, 2011. 5.
 - 13) 京都大学大学院工学研科 社会基盤工学専攻 水文・水資源学分野: CommonMP 情報ホームページ, <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/commonmp/>
 - 14) 佐山敬洋, Nay Myo Lin, 深見和彦, 田中茂信, 竹内邦良: 降雨流出氾濫モデルによるサイクロナルギス高潮氾濫シミュレーション, 水工学論文集, 第 55 巻, pp. S 529-S 534, 2011.
 - 15) 立川康人, 佐山敬洋, 寶 馨, 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.
 - 16) 京都大学大学院工学研科 社会基盤工学専攻 水文・水資源学分野: 淀川流域を対象とする実時間流出予測システム, http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/yodogawa/yodo_prediction.html
 - 17) (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.
 - 18) 佐山敬洋, 立川康人, 寶 馨, バイアス補正カルマンフィルタによる広域分布型流出予測システムのデータ同化, 土木学会論文集, 土木学会論文集 B, 64(4), pp. 226-239, 2008.
 - 19) 福山拓郎, 立川康人, 椎葉充晴, 萬 和明: ダム貯水池による流水制御過程を導入した実時間分布型流出予測システムの開発, 水工学論文集, 54, pp. 541-546, 2010.
 - 20) 立川康人, 須藤純一, 市川 温, 椎葉充晴: 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, 河川技術論文集, 14, pp. 35-40, 2008.
 - 21) 北川源四郎: 時系列解析入門, 岩波書店, 2005.
 - 22) 樋口知之: 粒子フィルタ, 電子情報通信学会誌, 88(12), pp. 989-994, 2005.
 - 23) 立川康人, 須藤純一, 市川 温, 椎葉充晴: 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, 水工学論文集, 55, pp. S_511-S_516, 2011.
 - 24) 土木学会水理委員会編: 水理公式集例題プログラム集, 平成 13 年版, 例題 2-2, 土木学会, 2002.