

データ同化技術を導入した実用的な河川水位予測手法の開発

土屋修一・川崎将生

1. はじめに

近年、記録的な豪雨が頻発し、それにより各地で水害が発生している。水害による人的、資産被害の軽減を図るためには、河川氾濫やその可能性のある状況下において、適切な対策を時々刻々と講ずる危機管理が重要である。降雨や河川水位の実況を把握することに加え、数時間先の状況変化を予測することは、的確な水防活動や避難を行う上で、必要不可欠な情報であり、河川水位予測技術の高度化の取り組みの重要性は高い。本文は、洪水時における河川水位の予測精度を向上させるための技術開発として、総合科学技術・イノベーション会議による戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「レジリエントな防災・減災機能の強化」課題②豪雨・竜巻予測技術の研究開発¹⁾において実施した河川水位予測技術の高度化の取り組みについて述べる。

2. 同化技術²⁾を導入した河川水位予測手法の開発

現在、河川事務所等で運用されている洪水予測システムでは、水位観測所毎の点的な観測、予測水位情報が提供されている。より効果的な避難行動、危機管理のために、河川縦断水位と堤防高、危険水位等との関係等を介して、上下流に連続的に氾濫がいつ、どこで、どの程度の規模で発生しうるか（洪水危険度）を表示（見える化）し、洪水危険度を線情報として提供することが求められている³⁾。河川水位予測モデルに河道水理モデルを組み込み、各断面の水位を計算することで、連続的な河川水位を把握することが可能となる。また、河川水位予測モデルにデータ同化技術を導入し、観測水位に適合するようにモデルパラメータ、状態量を推定した上で、予測計算を行うことで、精度の高い河川水位が予測されることが期待される。そこで、流出モデル+河道水理モデル+デー

タ同化技術で構成される河川水位予測モデルの開発を行った。

2.1 河川水位予測モデルの構成

2.1.1 流出モデル

流出モデルには、計算負荷が軽くリアルタイム演算に適している土研分布モデルを採用した。土研分布モデルは、格子メッシュの多段タンクの流出モデルで、表層、地下層からの流出を表現することが可能となっている。また、土地利用、土壌・地質から分類したカテゴリー毎にモデルパラメータを設定することで、土地利用・土壌・地質特性に応じた流出特性を簡潔に反映することが可能となっている。

2.1.2 河道水理モデル

河道水理モデルには、洪水波の伝播を非定常流として表現可能で、また、計算負荷が軽くリアルタイム演算に適している次元不定流モデルを採用した。流出モデルから計算される河道近傍の流量を河道水理モデルの横流入量として与えることで、流出モデルと河道水理モデルを連携した計算が可能となっている。

2.1.3 データ同化

データ同化技術には、非線形・非ガウス型の状態空間モデルであり、様々なモデルに容易に適用可能な粒子フィルタ⁴⁾を採用した。粒子フィルタは様々なパラメータ、状態量の値が設定された複数のモデル（粒子）毎の計算値を、観測値に対する確からしさ（尤度関数）をもとにフィルタリングを行い、確からしい粒子を選定する手法である。本文では、流出+河道水理モデルに対して、流出モデルのタンク貯留量、河道モデルの粗度係数に様々な値を設定することで複数の粒子による計算（アンサンブル計算）を行っている。データ同化に多地点の観測水位を用いた場合、現時刻の河川縦断方向の水面形を推定することとなる。推定した水面形を河道水理モデルにより下流へ伝播させて予測することで、特に洪水波の下流伝播に支配

される下流部の河川水位においては、予測精度の向上が図られることが期待される。

2.2 カスケード同化手法の開発

データ同化によって現時刻の河川縦断方向の水面形を推定するためには、流出モデルのタンク貯留量、河道モデルの粗度係数の空間分布を踏まえて小流域単位、河道区間単位等で粒子を準備し、多地点の観測水位を同化することが望まれる。そのためには、膨大な数の粒子を準備する必要があるため、計算負荷が問題となる。例えば、水位観測所間毎に河道の粗度が変化するとして、これに対応する粒子を準備する場合、(タンク貯留量、粗度係数数の分布数) \times (同化する観測所の数) となり、同化地点数のべき乗数の粒子数が必要となるため、多地点の観測水位を同化した河川水位予測計算をリアルタイムで行うことは困難となる。

そこで、河道を水位観測所毎に分割したカスケード区間を設定し、上流から下流へカスケード区間毎に順次データ同化を行う手法を開発した。

2.2.1 カスケード区間

カスケード区間とは、同化地点の水位観測所に対して上下流の水位観測所区間である。図-1はカスケード区間の設定のイメージであり、対象河川に対して区間をずらして一部重複させながら連続的に設定する。

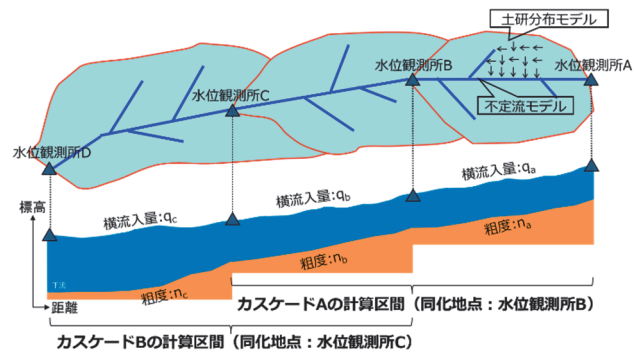


図-1 カスケード区間の概念図

2.2.2 カスケード同化の計算手順

カスケード同化における現況計算は、上流側のカスケード区間から、①流出+河道水理モデルによるアンサンブル計算、②フィルタリング計算を行い、順次、下流まで行う。なお、アンサンブル計算においては、流出モデルに実績雨量を与え、河道水理モデルは、カスケード区間の下流端境界に観測水位(例えばカスケードA区間については水位観測所Cの観測水位)、上流端境界に上流側

カスケードの計算流量(例えばカスケードA区間については水位観測所A地点の計算流量)、河道への横流入量に流出モデルの計算結果(例えばカスケードA区間については水位観測所A~C地点間の流出量)を与える。フィルタリング計算については、当該カスケード区間内の同化地点の観測水位(例えばカスケードA区間については水位観測所B地点の観測水位)を用いて粒子のフィルタリングを行う。フィルタリング後の粒子の同化地点における計算流量のアンサンブル平均は、下流側カスケードの河道水理モデルの上流端境界(例えばカスケードB区間における水位観測所B地点の計算流量)として用いられる。

同化計算後の予測計算については、現況計算においてフィルタリングした粒子にシステムノイズを付加し、タンク貯留高、粗度が異なる粒子を生成した上で、現況計算と同様に、上流側からカスケード区間毎にアンサンブル計算を行う。

カスケード同化により必要となる粒子数は(タンク貯留量、粗度係数の分布数) \times (観測所数) となり、同化地点数に比例した粒子数に減らせたことで、多地点の観測水位をデータ同化したリアルタイムの河川水位予測計算が可能となる。

3. 同化技術を導入した河川水位予測手法の適用

同化技術を導入した河川水位予測モデルを荒川流域に適用した。

図-2は、河川水位予測モデルを荒川流域へ適用した概念図を示しており、網掛けで示される範囲に流出モデルを、赤線で示される区間に河道水理モデルを適用している。また、四角で示される地点は、同化地点となる水位観測所を示している。

流出モデルは、土研分布モデルを250mメッシュで適用した。河道水理モデルは、直轄区間のみならず一部の県管理区間も対象としている。ま

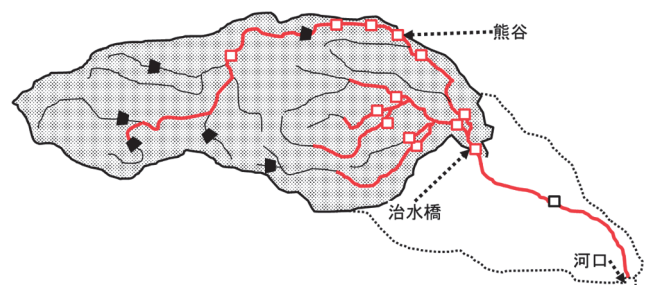


図-2 河川水位予測モデルの適用の概念図

た、河道水理モデルの対象区間に位置する水位観測所を対象に、カスケード同化を適用している。

3.1 再現シミュレーション

図-3は、2007年9月の出水事例における熊谷、治水橋水位観測所の再現シミュレーション結果を示している。図中の黒点は観測水位、各時刻の観測水位から始まる青線は予測水位を示しており、水位の観測時刻から6時間先までの予測結果を示している。本シミュレーションでは、予測計算に予測雨量を用いず、実績雨量を与えた再現シミュレーションとなっている。また、計算開始時刻における計算水位と観測水位の差分を予測結果に加える補正を行っている。いずれの計算結果においても観測値とよく一致した再現計算結果となっている。治水橋より上流に位置する熊谷の再現シミュレーション結果は、予測のバラツキが治水橋と比較して大きい。これは、上流ほど雨量、流出モデルの精度の影響が大きくなること、下流ほど洪水波の河道伝播による予測に支配されること、に起因すると考えられる。

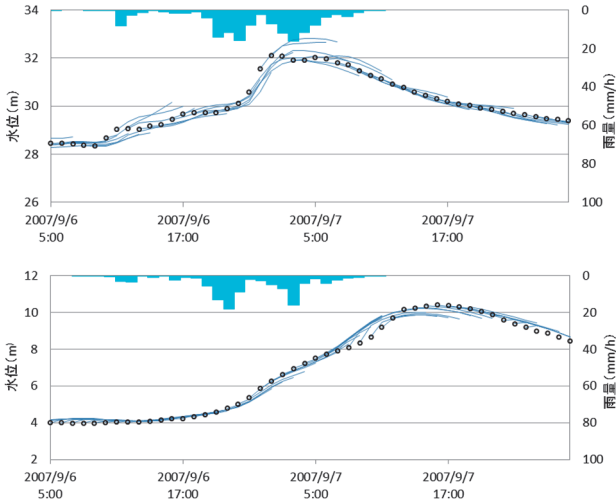


図-3 再現シミュレーション結果
(上図：熊谷、下図：治水橋)

図-4は同化技術を導入した河川水位予測モデルと河川事務所において使われている河川水位予測モデルにおける再現シミュレーション結果について、治水橋水位観測所の予測先行時間と誤差の関係を整理したものである。河川事務所の予測モデルは流出モデル+河道水理モデルで構成されているが、河道水理モデルの対象範囲が直轄区間に限られていること、同化技術が導入されていないところに、本モデルとの違いがある。河川事務所の

予測モデルは3時間先までの予測であるが、本モデルでは6時間先までの予測計算を行っており、予測リードタイムを長時間化しても予測精度が低下しにくく、また、河川事務所の予測モデルの3時間先の精度以上で6時間先まで予測可能であることがわかる。

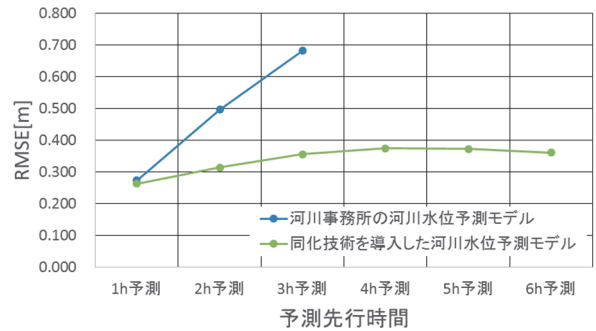


図-4 予測先行時間と予測誤差の関係（治水橋）

3.2 予測シミュレーション

図-5は、2015年10月の出水事例の治水橋水位観測所の上流の実績・予測雨量の時系列、予測計算に実績雨量を与えた再現シミュレーション及び予測雨量を与えた予測シミュレーション結果を示している。実績・予測雨量の時系列図において、灰色棒は実績雨量、各時刻から始まる青線は予測雨量を示しており、6時間先までの水位観測所の上流域の予測雨量を示している。また、再現、予測シミュレーションにおいて、丸印は観測水位、各時刻の観測水位から始まる線は、6時間先までの予測水位を示している。

実績雨量、予測雨量の差異に対して、再現、予測シミュレーション結果は、ほぼ同様の結果となっていることが確認できる。これは洪水の河道伝播による予測の影響が支配的であるために、予測雨量の精度の影響を受けにくいことを示していると考えられる。

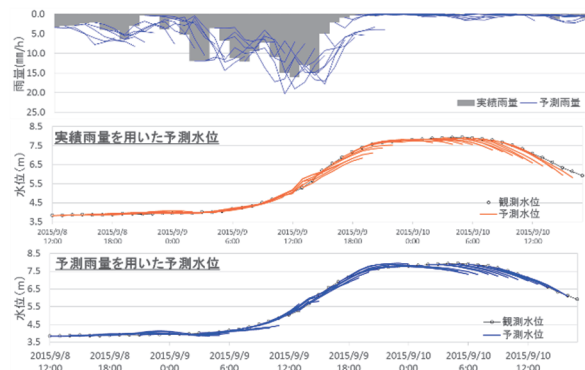


図-5 再現・予測シミュレーション結果の比較

4. 水害リスクライン

開発した河川水位予測モデルによる計算結果を用いて、河川縦断水位と各断面に設定されている危険水位等との関係等を介して、氾濫がいつ、どこで発生しうるか（洪水危険度）を表示（見える化）するシステムを開発した。

表示システムは、河川の断面毎（200～400m間隔）の水位と当該断面に設定されている危険水位との関係を危険度として評価し、各断面の危険度を河川に沿って色分けし、「水害リスクライン」として表示する。図-6は、危険水位と現況の河川水位の差を危険度とする水害リスクラインを表示した例である。図中の2本のラインが水害リスクラインを示しており、左右岸別に危険度を評価して表示される。また、危険度は、河川水位が危険水位を超えた場合は赤色、危険水位まで0～1mはオレンジ色といった具合に色分けをして示される。現況水位に代えて予測水位を用いて危険度を評価することで、6時間先までの水害リスクラインの変化を表示することが可能となっている。

河川水位予測モデルによる予測計算は、10分毎に最新の観測データ等を用いて行われ、予測結果は更新される。これを水害リスクラインとして表示することで、時々刻々変化する水位と堤防高等の関係をリアルタイムに把握し、氾濫の切迫度の高い箇所を俯瞰的かつ地先単位で把握することを可能としている。

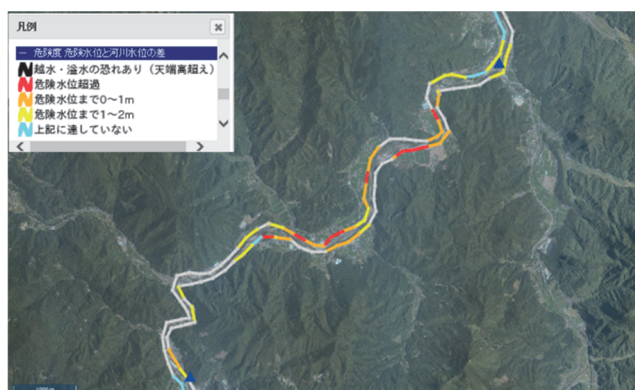


図-6 「水害リスクライン」の表示例

5. まとめ

流出モデル+河道水理モデル+データ同化技術で構成される河川水位予測モデルを開発した。また、カスケード同化手法を開発し、粒子フィルタを用いた多地点の観測水位の同化をリアルタイム

で計算することを可能にした。

同化技術を導入した河川水位予測モデルを荒川流域へ適用した結果、観測結果とよく一致した再現シミュレーションをすることができ、また、河川事務所の予測モデルより精度の高い予測が可能であることを確認した。データ同化技術を導入し、現時刻の河川縦断方向の連続的な水面形を精度良く推定し、これを河道水理モデルにより伝播させることで、予測雨量の影響を受けにくい河川水位予測が可能であることが確認できた。

データ同化技術を導入し、観測水位に適合するようにモデルパラメータ、状態量を推定した現況計算を行っても計算水位と観測水位の差異が生じる。そのため、今後の技術的な課題として、縦断的に現況の計算水位を補正する手法を開発していく必要がある。

また、国土交通省では、本文で示す同化技術を導入した河川水位予測手法による河川水位予測システムを全国の河川へ展開し、洪水危険度情報として水害リスクライン情報を提供することとしているところである。

参考文献

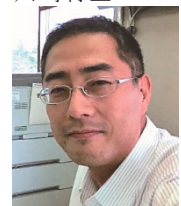
- 1) 戦略的イノベーション創造プログラム、レジリエントな防災・減災機能の強化、課題②豪雨・竜巻予測、http://www.jst.go.jp/sip/k08_team2.html
- 2) 土屋修一：データ同化（土木用語解説）、土木技術資料、第58巻、第1号、p.60、2016
- 3) 土屋修一、川崎将生：洪水危険度の見える化に向けた河川縦断水位の把握・予測技術の開発、土木技術資料、第59巻、第12号、pp.14～17、2017
- 4) 立川康人、須藤純一、椎葉充晴、キムスンミン：粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発、土木学会論文集B1（水工学）、Vol.67、No.4、pp.I_511～I_516、2011

土屋修一



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部水循環研究室 主任研究官、博士（工学）
Dr.Shuichi TSUCHIYA

川崎将生



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部水循環研究室長
Masaki KAWASAKI