

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属	役職	
	立川 康人(たちかわ やすと)	京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻	教授	
②研究テーマ	名称	粒子フィルタを用いた水位流量曲線および洪水追跡モデルの同定とリアルタイム水位予測		
	政策領域	[分野] 水防災技術分野	融合技術	
		[公募課題] 洪水予測技術の研究開発		
③研究経費 (単位: 万円)	平成25年度	平成26年度	総 合 計	
※端数切り捨て。	556	1,405	1,961	
④研究者氏名				
氏名	所属・役職 (※平成27年3月31日現在)			
萬 和明	京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻・助教			
椎葉 充晴	(一般社団法人) 流出予測研究所・会長			
⑤研究の目的・目標				
リアルタイムでの水位予測手法の精度向上を目的とし、以下の技術開発を実施する。				
(1) 粒子フィルタを用いた水位流量曲線および洪水追跡モデルの同定とそのリアルタイム水位予測への展開				
(1-1) 粒子フィルタを用いた水位流量曲線と洪水追跡モデルの同定手法の開発 (平成 25 年度) 粒子フィルタと二次元不定流計算手法を組み合わせ、モデルパラメータと境界条件の逐次同定計算手法を開発する。この手法を用いて観測水位データのみから洪水流量を推定し、観測範囲外にも適用できる水位流量曲線の作成に応用する。				
(1-2) 流出予測システムと組み合わせたリアルタイム水位予測手法の開発 (平成 26 年度) 所定の精度でパラメータおよび境界条件の推定を実現する粒子の設定方法を検討するとともに、流出予測システムと組み合わせた実時間水位予測手法を開発する。				
(2) 実時間予測のための CommonMP の機能分析と実時間流出予測システムの開発				
(2-1) CommonMP を用いた実時間流出予測システムの試作と機能分析 (平成 25 年度) カルマンフィルタを用いた基本的な実時間流出予測システムを CommonMP を用いて実現し、リアルタイム計算における CommonMP の機能を分析する。				
(2-2) CommonMP を用いた実時間流出予測システムの開発 (平成 26 年度) 上記の分析結果に基づいて、粒子フィルタあるいはアンサンブルカルマンフィルタを用いた、CommonMP を計算エンジンとする実時間流出予測システムとそれに必要となる要素モデルを開発する。				

計算を実施した一例である。粒子数が8個の場合は毎回の推定計算結果がばらつき、適切に推定できない場合があることがわかる。粒子数を32個から256個まで11通りの粒子数を設定して同様の推定計算を実施したとこと、今回の対象河川では32個以上に設定すれば適切に推定計算が実施できることが分かった。そこで以下の予測計算では粒子数を32個に設定して実施した。

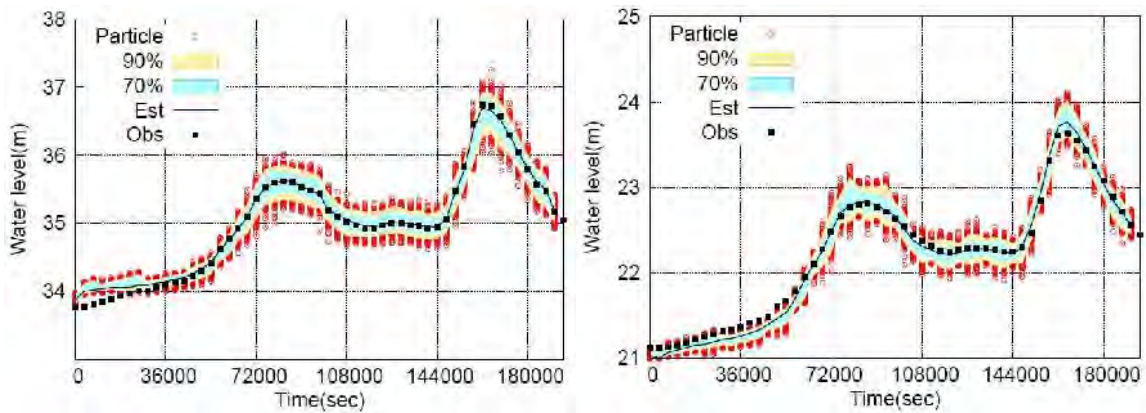


図2：水位の推定結果。左は天竜寺地点、右は桂地点（2014年台風11号洪水）

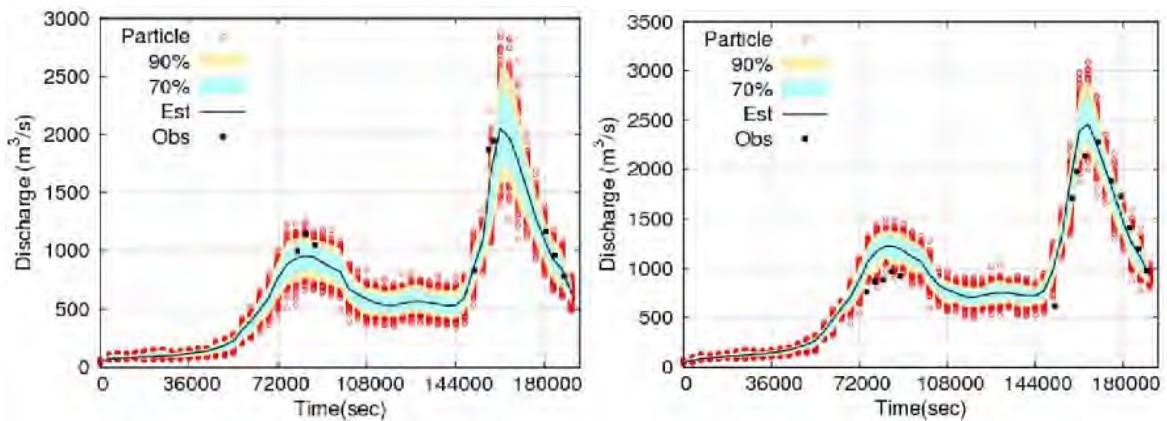


図3：流量の推定結果。左は天竜寺地点、右は桂地点（2014年台風11号洪水）

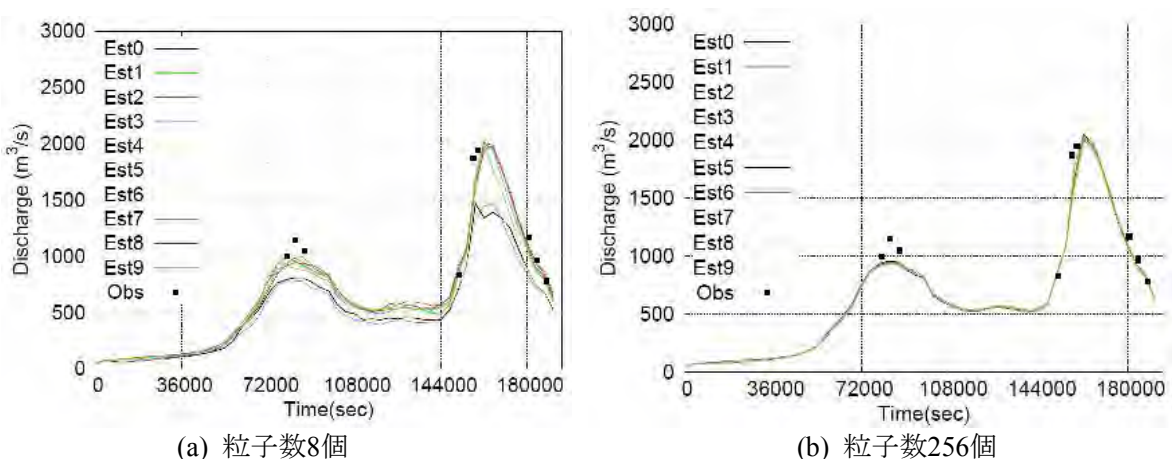


図4：粒子数の違いによる流量の推定結果の違い（天竜寺地点、2014年台風11号洪水）

次に、平成25年度に開発した洪水追跡モデルの逐次推定手法を発展させて、実時間水位予測手法を開発した。予測計算アルゴリズムは逐次推定システムと基本的に同様である。逐次推定システムでは観測時間間隔を1時間として、1時間先までの予測計算とフィルタリング計算を繰り返す

が、予測計算では所定の予測時間分まで予測計算を実施し、観測値が得られた時刻でフィルタリング計算を実施する。ここでは予測時間を3時間とし、対象河川区間上端で降雨流出モデルによる予測流量が提供され、河川区間下端では観測水位が予測時間分継続するものとして予測シミュレーションを実施した。2004年台風23号洪水に本手法を適用した結果を図5に示す。1時間先予測水位は推定計算結果とほとんど同じ結果となり、予測情報として用いることができると考えられる。しかし、2時間先予測では予測水位ハイドログラフの立ち上がりが遅れピーク時の水位が推定結果よりも小さくなり、3時間予測ではこの傾向がより明瞭となった。この原因は下流端水位の設定にある。ここで用いた手法では、下流端水位は現在時刻での観測水位が予測時間分、同じ値で継続するとした。このため洪水ピーク時刻付近では、予測計算時の下流端水位が実際よりも低いため、上端流入量が実際よりも小さく推定され、予測水位も実際よりも小さな結果となった。洪水立ち上がり時の予測の遅れも同じ理由による。基本的な水位予測アルゴリズムは完成したので、水位予測の向上は上流端流量の予測精度向上と下流端水位の設定手法に問題を絞ることができると考えられる。

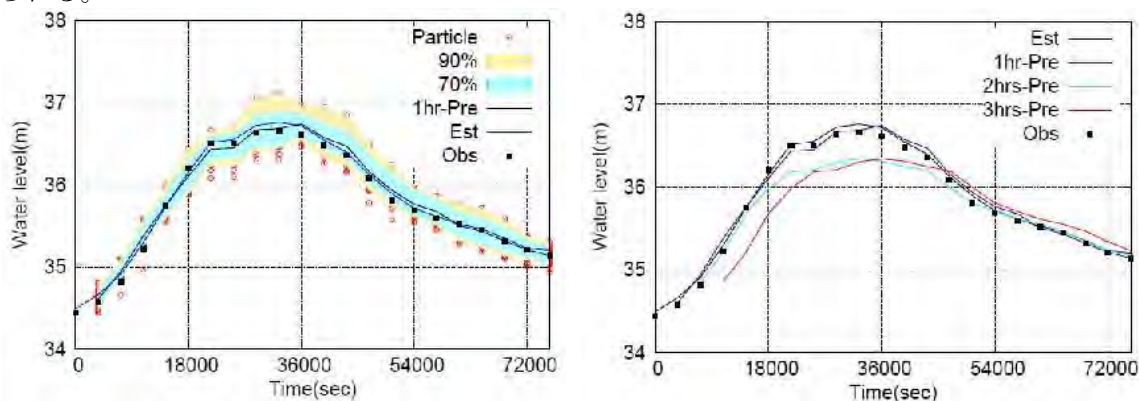


図5：天竜寺地点の1時間先予測水位(左)と1,2,3時間先水位の予測水位(右) (2004年台風23号洪水)

(2-1) CommonMPを用いた実時間流出予測システムの試作と機能分析

貯留関数法を用いた洪水予測モデルをCommonMPを用いて構成し、カルマンフィルタと組み合わせることで実時間流出予測システムを構築した。CommonMPのコマンドライン環境を利用し、水文水質データ取得ツールと組み合わせることで実際に実時間で稼働させたところ、問題なく動作することを確認した。

(2-2) CommonMPを用いた実時間流出予測システムの開発

平成25年度に試作した実時間流出予測システムを基本とし、複数の要素モデルから構成される降雨流出モデルをCommonMPを用いて構築して、粒子フィルタを用いた実時間流出予測システムに発展させた。また、CommonMPを用いた実時間水位・流量予測システムを構築するために、CommonMP上で動作するいくつかの要素モデルを開発した。

これらの要素モデルを利用して、まず一つの貯留関数法で構成される流出モデルをCommonMPで構築し、粒子フィルタを導入した実時間流出予測システムを木津川上流域(依那古観測所より上流域149km²)を対象に構築した(図6左)。流出計算はCommonMPのコマンドライン環境で実施し、粒子フィルタの計算部分はRuby言語で開発した。粒子数は25個として実施した予測計算結果を図6右に示す。赤印は各粒子の1時間予測値であり、観測流量と粒子の平均値を青線と緑線で示す。この適用例では降雨は観測降雨を予測降雨として与え、貯留量とモデルパラメータ k が分布するとして粒子フィルタを構成した。リサンプリングによって流量予測値の各粒子の平均値は観測値に近い値となり、粒子フィルタによるフィルタリングの効果を確認した。

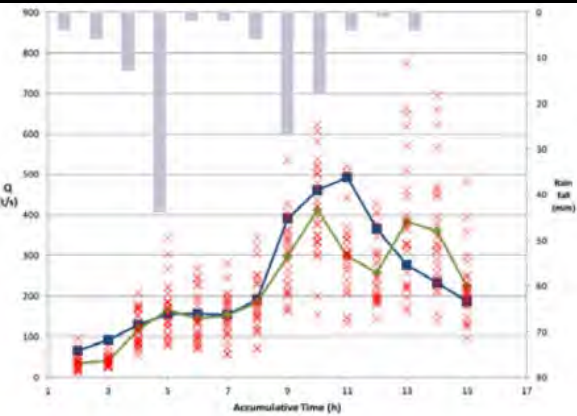


図6：依那古地点より上流の木津川流域モデルと1時間先流量の予測結果

次に、桂川上流域（天竜寺観測所より上流域818km²）を対象とする流出予測システムを構築した。この流域を対象としたのは、CommonMPを用いて複数の異なる要素モデルから構成される流出モデルを構築して、実時間予測アルゴリズムが適切に動作することを確認するためである。対象流域の概要を図7（左）に示す。対象流域は日吉ダム上流域と天竜寺地点までの残流域に分けられ、それらの流出モデルには連続計算用に改良した貯留関数法を用いた。また、日吉ダムによる流水制御の過程をダム要素モデルを用いて反映させた。この適用例では降雨は観測降雨を予測降雨として与え、貯留量とモデルパラメータ k 、ダム貯水位に不確かさがあるとして粒子フィルタを構成した。一時間先予測値を図7（右）に示す。赤印は各粒子の予測値であり、観測流量と粒子の平均値を青線と緑線で示す。フィルタリングの効果が表れ、観測値に近い予測結果結果が得られることを確認した。

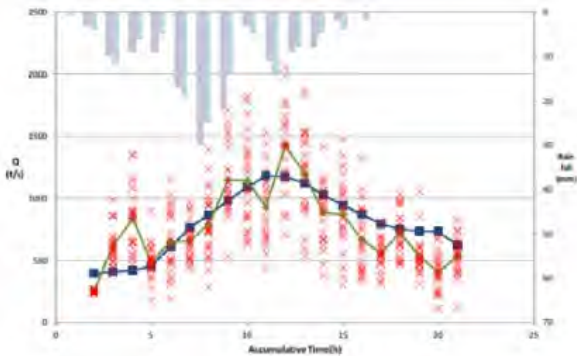
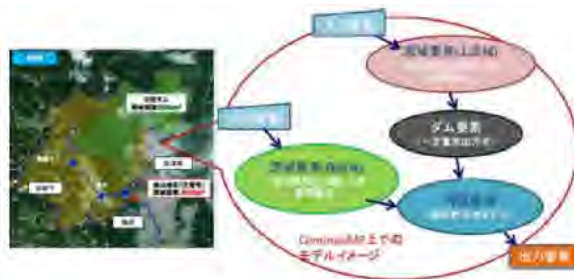


図7：天竜寺地点より上流の桂川流域モデルと一時間先流量の予測結果

ここでは二つの流域に対して粒子フィルタを組み合わせた実時間予測システムの構築例を示したが、他の流域を対象とする場合も、CommonMPを用いて流域に応じた水理・水文モデルを構築し、次に実時間流出予測システムを構築するためのスクリプトプログラムを用意すればよい。スクリプトプログラムはCommonMPを外部から動作させるプログラムである。ComonMPで構築した水理水文モデルの構成は、一定のフォーマットに従う構造定義ファイルで定義される。粒子フィルタでばらつきを与える対象とする状態量やモデルパラメータを定めれば、構造定義ファイルの該当部分を変更するようなスクリプトプログラムを準備することで、任意の流域を対象とする予測システムを構築することができる。なお、要素モデルとして、二次元不定流計算モデル、連続計算用に改良した貯留関数法、連続計算用タンクモデル、洪水流出計算用単位図法、洪水追跡計算用線形貯水池モデル、洪水追跡計算用マスキングモデルを構築した。これらの要素モデルは、研究代表者が所属する研究室のホームページで公開予定である。

⑦研究成果の発表状況

- これまでに発表した代表的な論文：

キムヨンス, 立川康人, 萬 和明, キムスンミン : 粒子フィルタと洪水追跡モデルを用いた水位流量曲線の作成および補正手法の開発, 河川技術論文集, 20, pp. 361-366, 2014.

立川康人, キムヨンス, 萬 和明, キムスンミン : 粒子フィルタと二次元不定流モデルを用いた2013年台風18号による桂川の洪水流量の推定, 平成25年9月京都・滋賀水害調査団報告書, 土木学会水工学委員会, 2014, 印刷中.

立川康人, 目野貴嗣, キム スンミン, 椎葉充晴: 2011年熊野川大洪水の再現計算からみた実時間河川水位予測の精度向上への課題, 河川技術論文集, 19, pp. 229-234, 2013.

- 国際会議、学会等における発表状況：

Yeonsu KIM, Yasuto TACHIKAWA, Sunmin KIM, Kazuaki YOROZU : Establishment and Uncertainty Assessment of the Water Stage and Discharge Relationship to Enhance and Evaluate the Uncertainties of Hydrologic Modeling and Prediction, AOGS, Sapporo, 2014.

Y. Kim, Y. Tachikawa, K. Yorozu, and M. Shiiba : Indirect method to establish a rating curve with 2D hydraulic model and particle filters, Proc. of 2013 Nakdong River International Water Week, International Water Forum on Water Cooperation and 7th World Water Forum, 30 Sep.-4 Oct. 2013, Gyeongju, Korea, pp. 352-376, 2013.

Yeonsu Kim, Yasuto Tachikawa, Kazuaki Yorozu, Michiharu Sshiiba: Improving Uncertain Boundary Conditions with 2D Hydraulic Model and Particle Filters, APHW1013, Seoul, Korea University, 2013.

Yeonsu Kim, Yasuto Tachikawa, Michiharu Shiiba, Sunmin Kim, Seong Jin Noh: Water stage prediction using 2D dynamic wave model and distributed hydrologic model based on sequential Monte Carlo method, ICWRER2013, Koblenz, 2013.

⑧研究成果の社会への情報発信

CommonMPに関する技術情報は、研究代表者が所属する研究室のホームページ

<http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/commonmp/index.html>

で情報を発信している。今回開発した要素モデルも上記のホームページを通して公開予定である。

⑨表彰、受領歴

なし。

⑩研究の今後の課題・展望等

粒子フィルタと二次元不定流計算手法を組み合わせ、モデルパラメータと境界条件の逐次同定計算手法を開発した。この手法を用いて観測水位データのみから洪水流量を推定し、観測範囲外にも適用できる水位流量曲線の作成に応用した。推定された流量は流観値とよく一致し、本手法によって作成した水位流量曲線は流観値と観測水位から作成されたそれとよく一致した。この手法を用いることにより、流量観測がない地点についても水位流量曲線の推定が可能となると考えられる。また、流量観測の範囲外となるような水位流量曲線も、流観と本手法を組み合わせることで作成可能と考えられる。また、河床変動計算モデルと不定流計算モデルを組み合わせることで、河床変動の推定手法に発展させることも考えられる。なお、実時間予測においては下流端の水位を境界条件として与える必要があり、この設定の仕方が低平河川における実時間水位予測の精度を決める鍵となるため、今後の検討が必要である。

CommonMPを用いた実時間流出予測システムについては、カルマンフィルタや粒子フィルタを組み合わせたシステム構築に難点はないと考えられる。観測情報を用いた同化計算結果をCommonMPを用いた水理・水文計算に反映させるためには、CommonMPで定義された構造定義ファイルを時々刻々書き換えることに帰着され、技術的な困難はない。CommonMPによる水工シミュレーション計算の並列化が実現できれば、粒子数が増大したとしても所定の時間内に実時間計算を終了させることは実現可能と考えられる。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

逐次同定計算手法によって観測水位データのみから洪水流量を推定することができれば、様々な地点での流量推定が可能となる。研究成果の実務への反映として、水位観測のみで流観がなされていない地点での流量推定や、流量観測が実現できないような大洪水の流量推定が挙げられる。平成25年台風18号は既往最大クラスの洪水であり、桂川では流量観測が途中から困難となった。この場合も水位データは存在したため、水位データから流量を推定することができた。さらにこの結果を用いて、観測範囲外にも適用できる水位流量曲線を作成することが考えられる。

この推定システムを実時間予測システムに適用する場合に鍵となるのは、これから予測しようとする水位を、それなりの精度で対象河川区間下端で与える必要があることであるが、一次元不定流計算モデルを用いて計算量を減らし、対象河川区間下端を河口とするような実時間水位予測システムを考えるのが実現可能な手法と考える。

実時間予測の精度を確保するためには、適切に同定された水工シミュレーションモデルと、カルマンフィルタや粒子フィルタなどの観測同化システムを組み合わせることが効果的である。CommonMPを用いた水工シミュレーションモデルの構築環境の整備は著しく進んでおり、CommonMPを用いた実時間流出予測システムの構築はシミュレーションモデルの保守や改良を加える上でも大変有効である。今後、多数の流域でCommonMPが水工シミュレーションに利用され、実時間予測にも用いられることが期待される。