

京都大学大学院工学研究科	学生員	○	福山拓郎
京都大学大学院工学研究科	正員		立川康人
京都大学大学院工学研究科	正員		椎葉充晴
京都大学大学院工学研究科	正員		萬和明

1 はじめに 近年、水系全体を対象として、ダム貯水池による流水制御過程を考慮した一体的な分布型流出予測システムが実現されるようになってきている。筆者らの研究グループでも淀川流域を対象とした分布型流出予測システム^[1]を開発し、その予測システムを実時間で稼働させて計算結果を実時間で確認することを可能としている^[2]。

本研究では、カルマンフィルタ理論を用い、流域全体を対象として、ダム貯水池による流水制御過程を考慮した実時間流出予測システムを構築することを目的とする。予測対象となる状態ベクトルに、河川流量に加えダム貯水量とダム貯水池からの放流量、ダム貯水池への流入量を追加する。また、カルマンフィルタ理論におけるシステム方程式に、河道における状態推移式^[3]に加え、ダム貯水池における連続式、ダム貯水池による流水制御過程を数理的に表現した式、ダム貯水池と上流の河道との接続関係を表現した式を追加し、それらをまとめて行列表示することで、データ同化を可能とする。

2 ダム貯水池による流水制御過程の数理的表現
ダム貯水池による流水制御過程はいくつかの操作に分かれており、複数の変数を用いてダム貯水池の操作規定と意思決定を定式化する。市川^[4]は、ダム貯水池の操作規定と意思決定を詳細に再現し、ダム貯水池の放流量と水位を予測する手法を提案し、ダム貯水池の流水制御過程をモデル化した。本節では、市川が提案したモデル化の手法を参考にし、現在時刻のダム貯水池からの放流量を、前時刻のダム貯水池の貯水量、ダム貯水池からの放流量、ダム貯水池への流入量、及び現在時刻のダム貯水池からの流入量を変数として定式化する方法を示す。また、定式化した式はいくつかの条件により場合分けされており、

独立変数との関係が折線関係で表されるため、Taylor展開を用いて線形化しようとするると困難が生じることがある。そこでその非線形な関数を統計的線形化手法^[5]を用いて線形化することを考える。

2.1 定式化 本研究の計算対象流域内に存在するダム貯水池は、全て洪水制御をその目的の一つとする多目的ダムである。それぞれのダム貯水池は異なった操作規定に従って運用されているが、洪水制御を目的としたダム貯水池は、通常時の操作、洪水警戒体制中の操作、予備放流操作、洪水調節操作、ただし書き操作、洪水調節後の操作の6段階の操作過程に一般化することができる^[4]。ただし、本研究では入力の情報として降雨の情報を与えておらず、降雨の情報によって操作の移行が判断される予備放流操作は考慮していない。ダム流水制御過程を定式化する場合、これら6段階(本研究では予備放流操作を除く5段階)の操作過程のいずれかにあり、予備放流操作を除く各操作過程にある場合の操作方法とその操作方法を行う場合の条件を定式化した。

2.2 統計的線形化手法による線形化 ダム貯水池における流水制御過程を数理的に表現した式 $Q_{out}^i = g_{RULE}(x)$ を統計的線形化手法により線形化する方法を述べる。4次元の確率ベクトル x が

$$x = \left[Q_{in}^i \quad V^{i-1} \quad Q_{out}^{i-1} \quad Q_{in}^{i-1} \right]^T \quad (1)$$

で与えられるとする。平均値 \bar{x} と共分散行列 P を用いて、統計的線形化により非線形関数 g_{RULE} は

$$g_{RULE}(x) \simeq B + G(x - \bar{x}) \quad (2)$$

と線形化することができる。ここで、

$$B_0 = B - G\bar{x} \quad (3)$$

$$G = [g_1 \quad g_2 \quad g_3 \quad g_4] \quad (4)$$

とすると、式(2)は、



図-1 木津川流域内飯岡地点上流域の詳細図

$$Q_{out}^i = g_1 Q_{in}^i + g_2 V^{i-1} + g_3 Q_{out}^{i-1} + g_4 Q_{in}^{i-1} + B_0 \quad (5)$$

となる。式(5)をダム貯水池による流水制御過程を数理的に表現した状態推移の式として本研究におけるカルマンフィルタ理論に適用する。

3 実流域への適用と考察 2004年8月の台風11号を計算対象洪水として、木津川流域内の飯岡地点上流域(流域面積1,589km²、図-1)を対象に、本手法を適用して流出予測計算を行った。図-1に示すように、木津川流域には流水制御過程をモデル化したダム貯水池は5基存在する。

更新計算に用いた観測値として、5基のダム貯水池における流入量と放流量、及び加茂地点の河川流量の計11種類を与えた。また、更新計算後の予測計算においても、入力となる予測降雨データに観測降雨を与えている。なお、システム誤差の分散、観測誤差の分散は、それぞれ事前推定値、観測値の5%の2乗とし、時間に応じて変化するとした。

図-2にフィルタリングによる更新計算結果と3時間先の予測計算結果を示す。また、カルマンフィルタ理論を適用していないオフラインでのシミュレーション結果と観測値も併せて示している。上から、青蓮寺ダムにおける放流量、飯岡地点における河川流量の計算結果である。

青蓮寺ダムの放流量の計算結果から、更新計算により観測値に近づき、3時間先の予測計算の結果はオフラインでのシミュレーション結果に近づいているのがわかる。また、飯岡地点の河川流量の計算結果から、約15km上流に存在する加茂地点の観測値を更

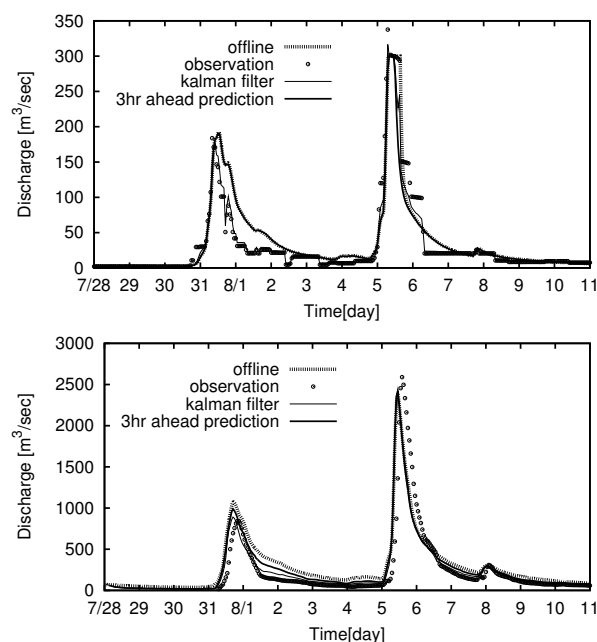


図-2 更新計算結果と予測結果(上から青蓮寺ダム放流量、飯岡地点河川流量)

新計算に用いることで、飯岡地点の更新計算後の流量が観測値に近づいているのがわかる。さらに、予測計算においては、オフラインでのシミュレーション結果に近づく傾向が青蓮寺ダムの放流量の結果よりも弱いのがわかる。

更新計算に自地点の観測値を用いていない飯岡地点のほうが予測計算の精度が良くなる結果になったのは、更新計算の結果、上流の加茂地点の流入量、5基のダム貯水池の流入量と放流量、及びこれらの観測地点近辺の河道の河川流量の初期値がより最適な値になるため、下流の飯岡地点の予測精度は上がったのではないかと考えられる。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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, Vol. 26, No. 2, pp. 189 - 201, 2007.
- [3] 立川康人, 福山拓郎, 椎葉充晴, 市川温: バイアス補正カルマンフィルタを用いた実時間分布型流出予測システムの改良, 河川技術論文集, 15, pp. 383-388, 2009.
- [4] 市川温: 分布型流域流出系モデル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.
- [5] 高棹琢馬, 椎葉充晴, 富澤直樹: 統計的二次近似理論を適用した流出予測システムの構成, 京都大学防災研究所年報, 第27号B-2, pp. 255-273, 1984.