

電力ダム操作のための実時間出水予測手法の精度向上について

On the improvement of real-time flood prediction model for dam operation

* ** *** **** *****
吉村清宏・藤田 暁・勝田栄作・高埴琢馬・椎葉充晴

By Kiyohiro YOSHIMURA, Akira FUJITA, Eisaku KATSUTA,
Takuma TAKASAO and Michiharu SHIIBA

In order to improve the flood forecasting accuracy for dam operation, we developed a real-time prediction system. The system is based on the filtering and prediction theory developed by Kalman and others. A lumped runoff model is transformed into a stochastic model by incorporating noise terms. The system takes account of the fact that the optimum values of the model parameters change from flood to flood. Three kinds of parameter are selected through the sensitivity analysis for many runoff data. Discharges are forecasted by use of prediction systems more than one, with different values of parameter respectively. Hence contributions to runoff is evaluated for each predicted discharge stochastically. Then most suitable discharge for flood runoff specified is determined by a weighting average method.

Keywords : flood runoff, real-time prediction, kalman filter,
storage function, dam operation

1. まえがき

発電用ダムの操作の特徴は、治水ダムでは洪水のピークカットを行うのに対し、ピークカットは行わず、流入量が『操作規程』に定義された洪水量に達するまでに貯水位を予備放流水位に低下させ、その後は放流量を流入量に等しくすることが挙げられる。出水時のダム操作で重要なポイントは2点挙げられる。第1は流入量が増加する状況下で適切なタイミングで初期放流を開始することである。第2は適切なタイミングに予備放流を開始し、流入量が洪水量に達するまでに水位を予備放流水位に低下させることである。初期放流にあたっては事前に関係機関への通知通報が義務づけられており、また予備放流操作にあたっては下流河川の急激な水位上昇を避けるとともに、水位を所定の時期までに予備放流水位に低下させることとなっている。

発電用ダムではこれら出水時の一連のダム操作を安全に遂行するために、各ダムで貯留関数法による流出モデルとカルマンフィルター理論を組み合わせた実時間出水予測モデルを作成し、ダム操作卓で流入量予測

-
- | | | |
|-------|--------|--|
| * | 正会員 | (株) ニュージェック 副社長
(〒 542 大阪市中央区島之内 1-20-19) |
| ** | 正会員 | (株) ニュージェック 技術開発部 (同 上) |
| *** | 正会員 | 関西電力(株) 宇奈月水力発電所建設所
(〒 938-02 富山県下新川郡宇奈月町赤田 3421-1) |
| **** | 正会員 工博 | 京都大学教授 工学部土木工学科
(〒 606-01 京都市左京区吉田本町) |
| ***** | 正会員 工博 | 京都大学防災研究所教授
(〒 611 宇治市五ヶ庄) |

を行うことにより操作の支援をしている事例がある¹⁾。これらの予測モデルは貯留関数法のパラメタを固定したモデルとなっているが、高棹らは同様の貯留関数法とカルマンフィルター理論を組み合わせた予測モデルをもとに、パラメタの1つである遅滞時間が出水毎に異なることを考慮した予測モデルを提案している²⁾。この手法は現におこりつつある出水に適応するモデルパラメタが、過去に同定されたモデルパラメタと適合するとは限らないという考えに基づいている。当然のことながらこの手法の考えに基づく出水毎に異なるパラメタを遅滞時間以外にも拡張することが可能である。

本研究では出水予測モデルの精度向上を目的として、予測モデルのパラメタの最適値が出水毎に異なることを考慮した実時間出水予測モデルを作成し、その予測精度について検討を行った。

2. 対象流域と現行の出水予測モデルの概要

神通川上流に位置する角川ダム流域（流域面積約720km²）内には6箇所の雨量観測所と1箇所の水位観測所が設けられている（図-1）。上広瀬地点の水位観測所で観測された水位は水位-流量曲線を用いることによって流量に変換されている。水位-流量曲線は年1回の定期的な測量と出水後の非定期的な測量により適宜修正されている。なお、上広瀬の水位観測所で測定された水位データは角川ダムに取り込まれ、ダム操作を行う際の情報として活用されている。

これまでに、角川ダム流域を単流域として扱った実時間流出モデルが作成されており¹⁾、その後予測精度を高めることを目的として、角川ダム流域を上広瀬流域と残流域に分割して扱うモデルの開発も行っている。このモデルでは上広瀬流域と残流域及び上広瀬～ダム間の河道とをそれぞれ貯留関数法モデルで表現し、カルマンフィルター理論を適用することによって各サブシステムの貯留量を逐次推定しながら、時々刻々のダム流入量を予測する。本研究ではこの角川ダムの予測モデルのうち、上広瀬流域（流域面積約470km²）の予測モデルを対象として、予測精度をさらに向上させることを検討する。以下に予測モデルの概要を示す。

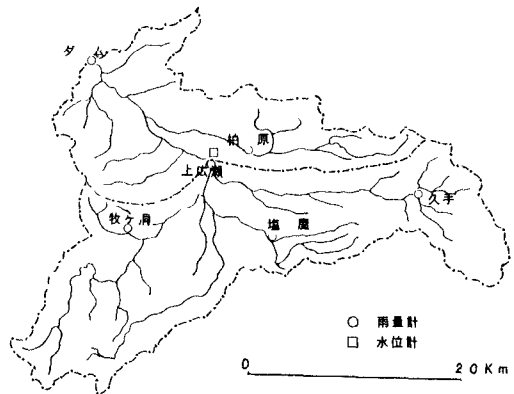


図-1 角川ダム流域と雨量・流量観測所

本流出モデルで用いている貯留関数法は、次の運動方程式と連続式で表すことができる。

$$\text{・運動方程式} \quad S(t) = K q(t)^P \quad (1)$$

$$\text{・連続式} \quad dS(t)/dt = r_e(t - t_L) - q(t) \quad (2)$$

ここに、 $S(t)$ ：流域貯留量(mm)、 $q(t)$ ：流出高(mm/h)、 $r_e(t - t_L)$ ：遅滞時間を考慮した有効雨量強度(mm/h)、 t_L ：遅滞時間(h)、 K, P ：定数である。式(2)中の有効雨量強度 r_e は次のようにして求める。まず、上広瀬流域内の4箇所の雨量観測所の観測雨量からティーセン法により流域平均雨量強度を計算し雨量倍率を乗じる。

$$r = \gamma \cdot r_{ave} \quad (3)$$

ここに、 r ：雨量倍率を考慮した流域雨量強度(mm/h)、 r_{ave} ：ティーセン法により算定した流域平均雨量強度(mm/h)、 γ ：雨量倍率である。次に、飽和雨量、一次流出率を導入して有効雨量強度 r_e を計算する。すなわち、累加雨量が飽和雨量に達するまでは雨量強度 r に一次流出率を乗じたものを有効雨量強度 r_e とし、累加雨量が飽和雨量に達した後は雨量強度 r をそのまま有効雨量強度 r_e とする。

$$\begin{aligned} R < R_{sa} \text{ のとき} & \quad r_e = f_1 \cdot r \\ R \geq R_{sa} \text{ のとき} & \quad r_e = r \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 f_1 ：一次流出率、 R_{sa} ：飽和雨量(mm)、 R ：累加雨量(mm) ($= \sum r \Delta t$)、 Δt ：雨量強度の観

測時間間隔 (h) である。

以上により構成される流出モデルは合計 6 個のパラメータを用いている。上広瀬におけるモデルパラメータは 1989 年から 1992 年にかけての雨量、流量データをもとに、最適化手法 (SP 法) を適用して、表-1 のように同定されている。既往の手法では、この流出モデルにカルマンフィルターを適用して出水予測モデルとしている。

表-1 上広瀬流出モデルのモデルパラメータ
(単位: mm-hr)

K	P	t_L	γ	R_{sa}	f_1
60.5	0.336	1.0	1.01	81.2	0.674

3. 最適なパラメータが出水ごとに異なることを考慮した予測モデルの概要

3. 1 出水予測システムの計算方法について

本研究では上記の既往流出モデルをベースに出水予測モデルを構築するものとし、以下のようにシステム方程式を構成する。

・状態方程式
$$dS(t) / dt = r_o(t - t_L) - q(t) + w(t) \tag{5}$$

・観測方程式
$$q_k = (S_k / K)^{1/P} + v_k \tag{6}$$

ここに $w(t)$, v_k はシステムノイズ、観測ノイズである。これらの方程式を線形化する手法およびカルマンフィルターの計算手法などは、高埴ら³⁾と同様でありここではその詳細については割愛する。

3. 2 洪水ごとに最適なパラメータが異なることを考慮した出水予測モデルの構成

最適値が出水ごとに変動するパラメータを 1 つ選び、これを p と表すことにする。 p の出水毎のばらつきに対処するために、このモデルでは、 p の設定値が異なる複数の実時間出水予測システムを平行して同時に進行させる。そして、各々の出水予測システムから出力される予測流出高に重み付けを施して平均を取り、これをモデル全体での予測流出高の値とする。各システムに対する重みは流出高の観測値が得られるたびに更新され、その更新の方法は次の通りである。まず、観測値を得て各システムでフィルタリングを行い、システムごとの流出高の推定値とその誤差分散を求める。流出高の推定値の誤差の確率分布が正規分布に従うと仮定すると、各システムごとに、その時刻の観測流出高が生起する確率密度が求まる。この確率密度の値を前時刻における重みに掛け合わせることで重みを更新する。こうして重みを更新することで、時間を追うごとに観測値との適合の良い推定値を出力するシステムの重みが増加することになる。アルゴリズムの詳細は、文献 2) を参照されたい。

4. 最適なパラメータが出水ごとに異なることを考慮した予測モデルの上広瀬流域への適用

前述した出水予測モデルを、上広瀬流域の 1989 年から 1994 年にかけての 19 出水に適用し、予測シミュレーションを行う。一つのパラメータに複数個の値を準備した場合と、単一の値を用いた場合の結果と比較することにより、この出水予測モデルの効果を検討する。パラメータの値は表-1 の値を基準値とし、変動を考慮しないパラメータは基準値を用いる。出水予測の際のシステムノイズの分散は、 1.0 (mm)^2 、観測ノイズの分散は、 0.1 (mm/h)^2 とした。30 分間隔の雨量・流量データを用い、計算時間間隔も 30 分とした。予測は 1 時間先の予測を行い、予測値と実際に得られた 1 時間後の観測値との間の誤差により予測結果を評価する。

出水ごとの変動を考慮するパラメータとして、遅滞時間 t_L 、雨量倍率 γ 、および、貯留関数法の定数 K を選び、それぞれの場合について予測シミュレーションを行った。これらのパラメータの種類の選定に際しては、各パラメータの変動がハイドログラフの形状に与える影響の分析を行い、その結果を踏まえている。まず、この分析について説明し、その後に予測シミュレーションの結果について記す。

4. 1 パラメータ選定のための分析

各パラメータの変動がハイドログラフの形状に与える影響の大きさを把握するため、次の 2 点を検討する必要がある。まず、「実際にそのパラメータの最適値が出水ごとにどの程度変動するか」、そして「そのパラメータの変動によりハイドログラフの形状はどの程度影響を受けるか」、である。

前者の評価の指標として、出水ごとのパラメタの最適値を感度分析的に調べ、その標準偏差を求めた。ここで、各パラメタの最適値は一つのパラメタに着目し、そのパラメタを除く残りの全てのパラメタを基準の値に固定した流出モデルに、雨量を与えて得られるハイドログラフと観測ハイドログラフの差を最小にする値を採用する。

次に後者の評価を行うため以下の分析を行った。まず、全てのパラメタを基準値に固定して、流出モデルに雨量を与え、得られるハイドログラフを基準ハイドログラフとする。次に1つのパラメタの値を±10%変化させ、同様にハイドログラフを描き、基準ハイドログラフとの平均2乗誤差を求める。各出水における誤差の平均をとり、そのパラメタの変動がハイドログラフの形状に与える影響を表す指標とする。

これら2つの指標を掛け合わせ、その数字の大きいものを変動を考慮すべきパラメタとして選択する。分析の結果、雨量倍率 γ の変動の影響が最も大きく、次いで貯留関数法の定数 K という結果を得た。

4. 2 出水予測シミュレーションの結果

まず、全てのパラメタを基準値に固定した場合の予測シミュレーションを行った。この設定は現行の予測方法に相当するものである。ただし、雑音の設定などが異なるため、実用されているモデルとは若干異なる。

図-2は、シミュレーションによる結果の1例であり、1990年9月の出水のものである。この出水は全出

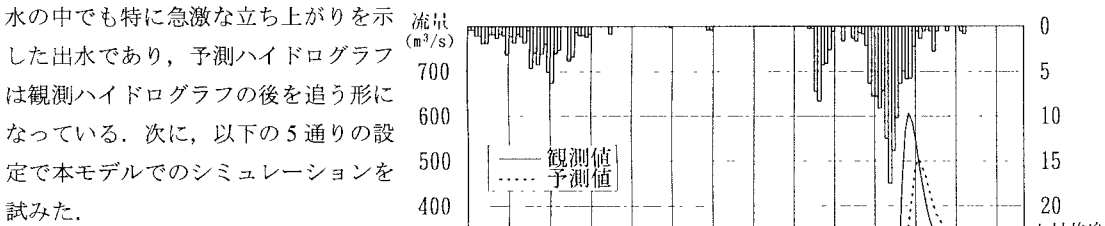


図-2 全パラメタを固定したモデルによる予測

① 遅滞時間 t_L の変動を考慮する。

遅滞時間 t_L に対し1.0, 1.5, 2.0, 2.5時間の4通りの値を準備する。ここに、予測時間を1時間としたため、遅滞時間には1時間以上という制約を付けて設定している。

② 雨量倍率 γ の変動を考慮する。

雨量倍率 γ に対し0.7～1.3の範囲で0.1刻みに7通りの値を準備する。

③ 定数 K の変動を考慮する。定数 K に対し10.0～70.0の範囲で

10.0刻みに7通りの値を準備する。

④ 遅滞時間 t_L と雨量倍率 γ の変動を両方考慮する。パラメタの値の設定は①、②と同様とし28通りの t_L と γ の組み合わせを準備する。

⑤ 遅滞時間 t_L と貯留関数法の定数 K の変動を両方考慮する。パラメタの値の設定は①、③と同様であり、28通りの t_L と γ の組み合わせ

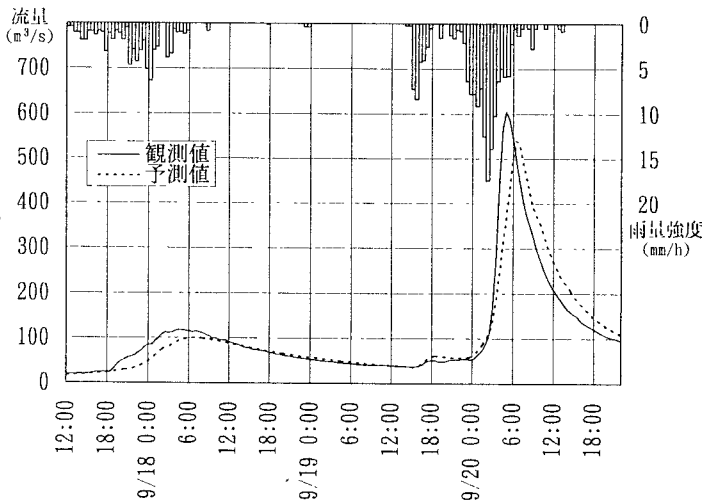


図-3 ①遅滞時間 t_L の変動を考慮するモデルによる予測

せを準備する。

なお、本モデルでは重みの初期値を設定する必要があり、上の5ケースでは各々の値の重みの初期値を等しく設定して与えた。①～⑤のケースについてそれぞれ、図-2と同じ出水の予測ハイドログラフを示す(図-3～7)。これらの結果および他の出水の結果から以下のようなことがわかった。

- ・①, ②, ③の1種類のパラメタの変動だけを考慮したケースは、全てのパラメタを固定した場合とほとんど精度に差が見られない。
- ・④, ⑤の2種類のパラメタの変動を考慮したケースの場合は、①, ②, ③のケースよりも精度が幾分改善される場合が多い。
- ・特に、図-2の様に立ち上がり部分の精度が悪かった出水では、④, ⑤の設定方法を用いることにより立ち上がり部分の精度が向上している。
- ・①～⑤の全般に関して、予測精度が良くなった出水は、単独のピークを持つ比較的単純な形状のハイドログラフの出水が多い。
- ・逆に、複雑な形状の波形を持つ出水では、予測精度はかえって悪くなる場合もある。

出水中の重みの推移を見ると、どのパラメタのケースも出水の立ち上がりからピークにかけて重みが激しく変動し、重みの順位も入れ替わる。このことから、本流出モデルでは立ち上がりからピークにかけて各時刻ごとに最適なパラメタの値が急激に変わってゆくものと思われる。なお、本モデルでは、1時間後の流出高の予測に用いる重みは現時点までの推定値と観測値の適合度に基づいており、現時点から1時間後までの間にパラメタの最適値が大きく変わるような場合には対応できない。

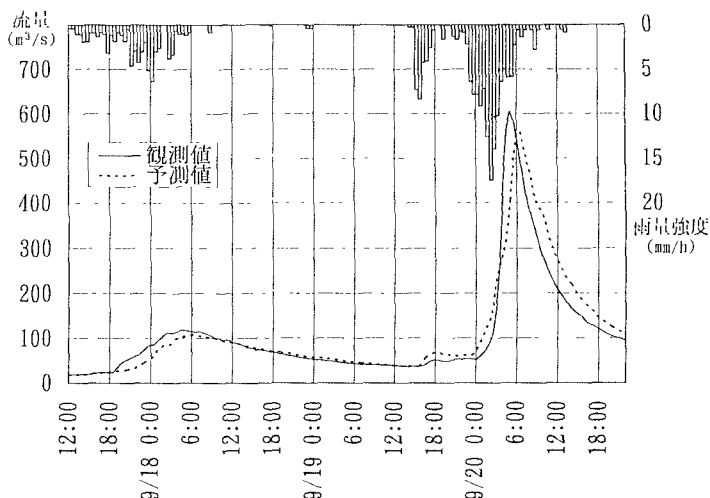


図-4 ②雨量倍率 γ の変動を考慮するモデルによる予測

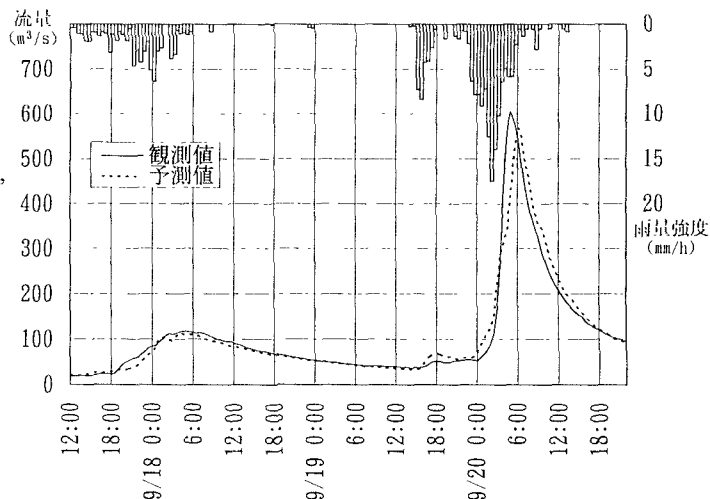


図-5 ③定数 K の変動を考慮するモデルによる予測

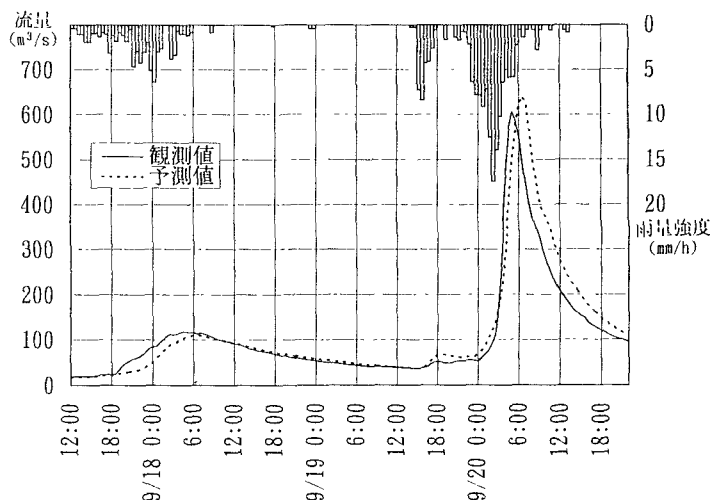


図-6 ④ t_L と γ の変動を考慮するモデルによる予測

このために大幅な精度の向上が見られなかったと思われる。しかし、立ち上がり部分の精度が向上したことから、本モデルは出水ごとにパラメタの最適値が異なることに対して有効であると言える。

5. あとがき

以上、本研究では実時間出水予測モデルの精度向上を目的として、流出モデルのパラメタの最適値が出水ごとに異なることを考慮した確率予測システムを作成して、電力ダム上流域を対象に適用性を検討した。得られた結果を要約し、今後の課題を述べると次のようである。

- ・流出モデルのパラメタの変動を考慮する場合、1種類だけのパラメタについて考慮した予測精度はパラメタの値を固定した場合の予測精度と同程度であった。
- ・2種類のパラメタを変動を考慮した場合、出水の立ち上がり部分の予測精度について改善が見られた。
- ・今後は、今回取り上げなかったパラメタの組み合わせや、3種類以上のパラメタの変動の考慮についても検討する。特に、有効降雨を求める際のパラメタである飽和雨量は出水毎に異なると考えた方が自然である。本研究の有効降雨の算出では実用性を考え簡便な方法を用いているが、パラメタの値の変動を考えることにより、より適切な有効降雨の推定が行えるようになる可能性がある。
- ・パラメタの最適値の時間変化が緩和されるよう、フィルタリングの時間ピッチを短くする等による予測システムの改良を試みるつもりである。

なお、本研究を遂行するに際しては、京都大学工学部立川康人助手に協力を得たことを付記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 白木亨, 中村幾雄, 岩永建夫: 電力ダム操作のための実時間確率出水予測モデルの実用化, 土木学会論文集, 第399号, pp.221-230, 1988.
- 2) 高棹琢馬, 椎葉充晴, 立川康人: 河川水位実時間予測手法の開発と木津川上流域への適用, 土木学会論文集, No 503, pp.19-27, 1994.
- 3) 高棹琢馬, 椎葉充晴, 宝馨: リアルタイム出水予測のモデルと手法, 京都大学防災研究所水資源研究センター研究報告, pp 19-31, 1985.

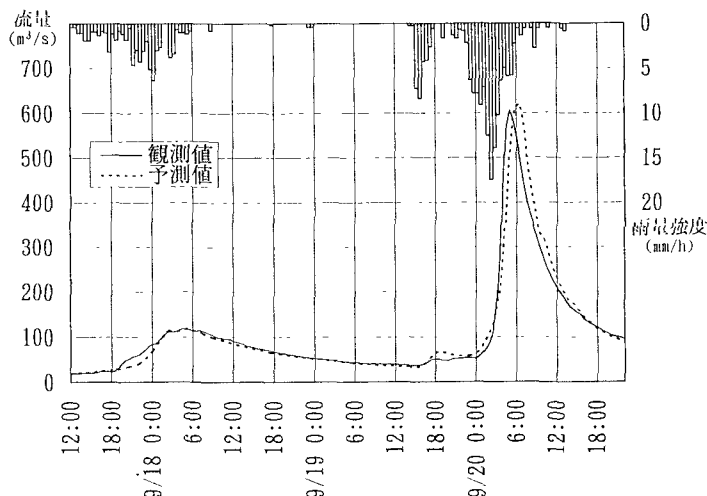


図-7 ⑤ t_L と K の変動を考慮するモデルによる予測