

分布型流出モデルに基づく ダム流入量予測システムの構築

DEVELOPMENT OF DAM INFLOW PREDICTION SYSTEM
BASED ON DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF MODEL

橋本 徳昭¹・藤田 暁²・椎葉 充晴³・立川 康人⁴・市川 温⁵
Noriaki HASHIMOTO, Akira FUJITA, Michiharu SHIIBA,
Yasuto TACHIKAWA and Yutaka ICHIKAWA

¹フェロー会員 工修 関西電力株式会社 (〒530-8270 大阪市北区中之島 3-6-16)

²正会員 修(工) 株式会社ニュージェット 河川グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

³正会員 工博 京都大学教授 大学院地球環境学堂 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所社会防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵正会員 博(工) 京都大学助手 大学院地球環境学堂 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

We have developed and implemented a real-time dam inflow prediction system based on a distributed rainfall-runoff model. The system predicts dam inflow for 6 hours every 10 minutes, receiving predicted rainfall data and calculating hillslope runoff and river flow on channel network. River flow is routed with the lumped kinematic wave model, of which state variables are updated by the Kalman filter with observed inflow data of the dams.

Additionally, to improve the accuracy of prediction for practical use, we estimate effective precipitation using a runoff coefficient which varies with cumulative rainfall, and introduce addition of base flow discharge considering influence of snow melt.

The system has been already installed into the dam administration offices on the Kurobe-River basin and is being used for practical purposes.

Key Words : *real-time runoff prediction, distributed rainfall-runoff model, kalman filter*

1. はじめに

発電専用ダムは治水容量を有しておらず、洪水時に洪水調節を行わない。すなわち、貯水池の上下流でダム操作に起因する事故が発生しないよう、洪水中は放流量を流入量に等しくして、ダムが無かった場合の自然の流況を維持することが原則となっている。さらに、平常の洪水吐ゲート全閉の状態からゲート放流を開始する際（これを「初期放流」という）や、洪水に先立って貯水池水位を低下する際（これを「予備放流」という）、また、流入量の急激な増加に対処するために基準を超える急激な放流量増加を行う場合には、事前にサイレンの吹鳴および関係各所への通知・通報等を行う必要がある。

このような通知・通報等のタイミングが遅れると、放流にも遅れが生じ、貯水池の規模が小さいダムにおいては、貯水位が短時間のうちに上昇して危険な状態を招く場合もある。そこで、筆者ら^{1),2),3)}は、流入量の変化に応じた安全なダム操作を行うために、精度の高い数時間先

までのダム流入量予測手法の開発を進めてきた。

本稿では、このような発電用ダムの操作支援を目的として構築した、実時間ダム流入量予測システムについて報告する。

構築したダム流入量予測システムは、グリッド形式の実況雨量、予測雨量データ⁴⁾を受信し、それらの雨量データに基づいて流出モデルによる流出計算を行い、10分ごとに、6時間先までのダム流入量を予測するものである。流出計算に対してカルマンフィルタを適用し、ダムで計測される実際の流入量のデータを逐次、流出計算にフィードバックし、予測精度の向上を図っている。

分布型流出モデルを用いることにより、グリッド形式の雨量データがもつ降雨の空間分布の情報を活かすことができ、流域内のある地点に集中して降雨があった場合の流出や、雨域が移動していく場合の流出を、適切に計算することができる。

また、河川の流量を実時間で予測する場合、観測により得られる時々刻々の流入量の値を、計算にどのように

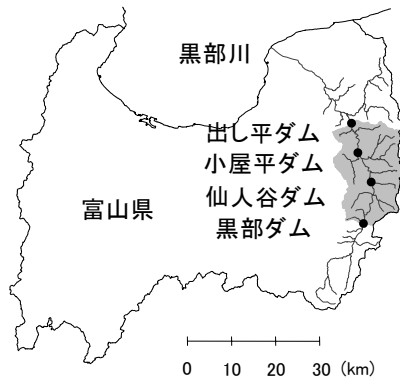


図-1 対象流域

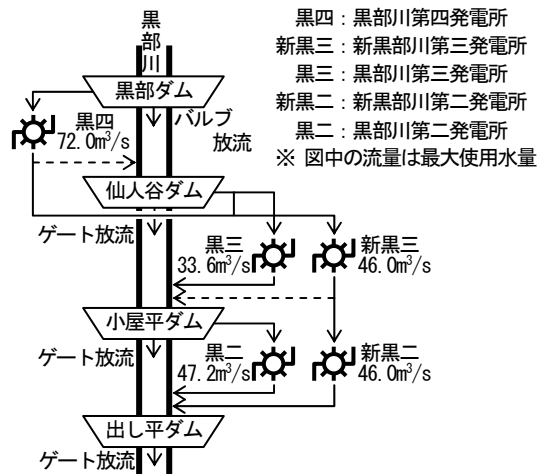


図-2 出し平ダム上流の発電所

フィードバックするかが、予測精度向上の大きな鍵となる。一般に、流出モデルにカルマンフィルタを適用してフィードバックの計算を行うのが、有効な手法として認められているが、分布型の流出モデルでは、取り扱う変数が膨大な個数になり、観測値を適切にフィードバックすることが容易ではない。

また、分布型の流出モデルは一般に長い計算時間を要することから、実現系よりも充分速い計算スピードが要求される実時間流量予測には用いられてきていない。

本システムでは、分布型の流出モデルをベースにしつつ、対象流域を部分流域に分割し、部分流域ごとにモデルを集中化することで、実時間でのダム流入量予測を実現した。

2. 対象流域の概要

流入量予測システムの対象は、黒部峡谷に位置する関西電力（株）出し平ダム、小屋平ダム、仙人谷ダムである。上流には、同じく発電専用ダムである黒部ダムがあるが、下流の3ダムと異なり貯水容量が大きく、通常、洪水を貯め込む操作が行われるため、流出計算を行う対象流域は黒部ダムよりも下流とした（図-1参照、流域面積272.7km²）。流域はきわめて急峻な山岳地帯であり、

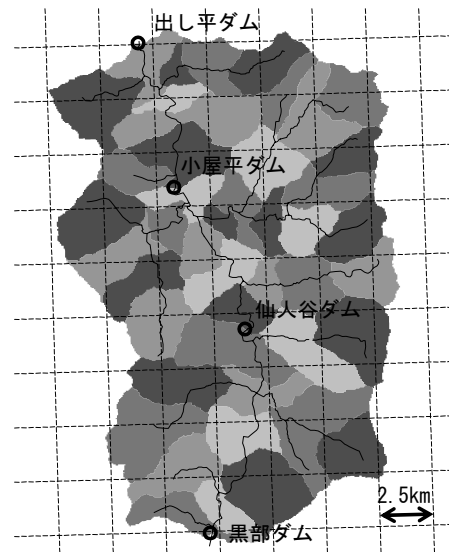


図-3 対象流域の分割と雨量データのグリッド

人家、田畑等はない。

流域内には、図-2に示すとおり、5つの発電所があり、黒部川に対して取水、放水を行っている。

3. 予測計算手法の概要

本システムの流出計算は、斜面の流出計算、河道の流れの計算の2ステップからなる。それぞれについて概要を示すと以下のとおりである。

(1) 斜面の流出計算

斜面の流出計算は市川ら⁵⁾の「集中化された表面流・中間流統合型kinematic waveモデル」を用いて計算する。この計算モデルの作成手順は次のとおりである。

まず、国土地理院の数値地図（50mメッシュ標高）から落水線を生成し、その落水線上で表面流と中間流を扱うkinematic waveの計算を行うモデルを作成する。

つぎに、この詳細なモデルは計算に時間を要するので、モデルを集中化し、計算時間を実用的なレベルまで軽減する。この集中化は、元の詳細なモデルの計算に基づいて流域の貯留高と流出高の関係を表すテーブルを作成しておき、そのテーブルに基づく貯留関数法の計算を元の詳細なモデルの代用とするものである。テーブルの作成は、元の詳細なモデルに定常な雨量を降らせ、その状態で流域の落水線上に存在する総水量を流域の貯留高と見なし、雨量（＝流出高）と貯留高の関係を整理することにより行う。

上記の集中化は、対象流域を図-3に示すように45個の部分流域に分割し、各部分流域ごとに行なった。なお、この流域分割は、雨量データの空間分解能を生かすべく、各部分流域の面積が雨量データのグリッドのサイズ（2.5km×2.5km）と同程度になるようにした。

以上の斜面の計算モデルでは、表面流の等価粗度、お

よび中間流における表層の透水係数，土層厚，空隙率がパラメータとなる．これらについて本システムの対象流域では，土地利用がほぼ一様（山林）と見なせることから，流域全体で一律の値を用いるものとし，流出計算結果が実績流入量に合うように，値を同定した．

(2) 河道の流れの計算

河道の流れは，高棟ら⁶⁾の「河道網集中型kinematic waveモデル」で計算する．また，その計算に対しカルマンフィルタを適用し，ダムで計測される実際の流入量のデータを逐次，計算にフィードバックする．

河道網集中型kinematic waveモデルは「部分流域内の河道網では流量が河道に沿って直線的に一定の変化率 $q_0(t)$ ($m^3/s/m$)になっている」という仮定を設け，各部分流域の流量変化率 $q_0(t)$ の時間変化を計算しながら，流量を計算するものである．この方法により，河道を細かい節点で区切らず，比較的短時間で洪水の伝播を計算することができる．

また，このモデルへのカルマンフィルタの適用にあたっては，各部分流域の流量変化率 $q_0(t)$ をモデルの状態量と位置づける． $q_0(t)$ の時間変化を表す状態方程式には有色のシステムノイズを付加し，ダム流入量の観測値を用いて全部分流域の $q_0(t)$ および有色ノイズの最確値を推定し直しながら，河道の流れの計算を進める．これは，藤田ら¹⁾と同様の手法であり，当流域では，出し平・小屋平・仙人谷の3ダムにおける流入量の10分毎の観測値を用いて，この計算を行うものとした．

(3) 流入量予測計算の流れ

以上(1)，(2)を実施する1回分の計算の流れは，以下のとおりである．これらを10分おきに繰り返す．

- ①雨量（実況・予測）およびダムの流入量・放流量・発電取水量のデータを受信する．
- ②前回（10分前）の計算で河道モデルの状態量を保存記録した時刻から，最新の流入量観測値が得られた時刻まで，流出計算を行う．
- ③ダム流入量の観測値を用いて，カルマンフィルタにより，河道モデルの状態量を推定し直す．推定し直した状態量は，次回の計算に用いるため記録保存しておく．
- ④推定し直した状態量を初期値として用いて，6時間先までの流出計算を行う．流出計算は，実況雨量が得られている時間は実況雨量を用い，それよりも将来については予測雨量を用いる．
- ⑤算出された6時間先までのダム流入量を画面表示する．

4. その他現地適用にあたっての工夫

(1) 有効降雨の算定

流出計算においては，樹冠遮断や地中への浸透による降雨損失の見積もり方が，計算結果に大きく影響する．

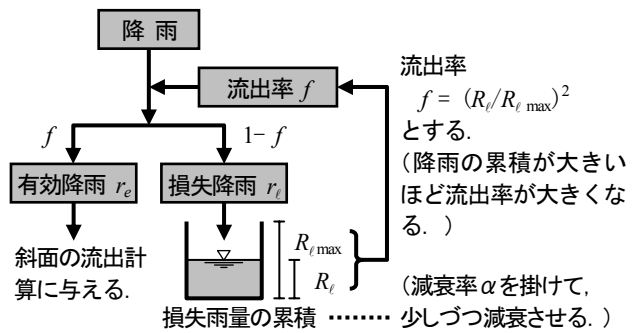
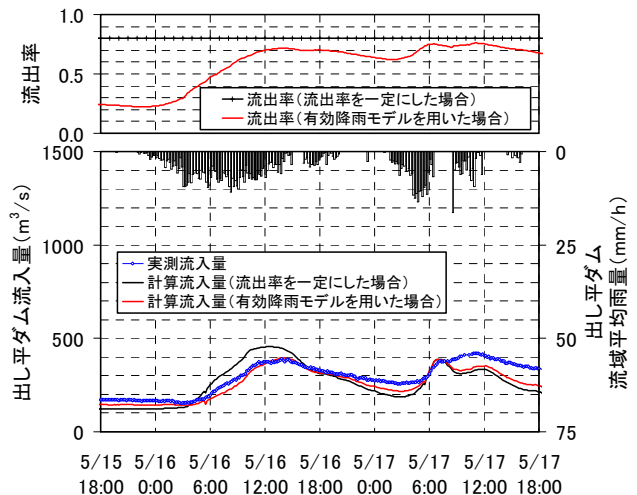
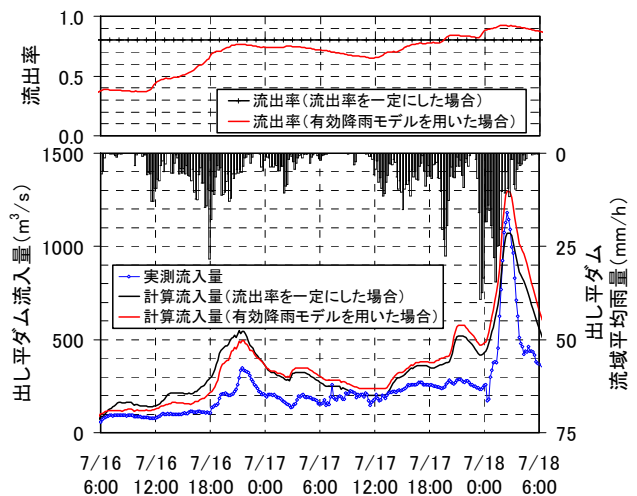


図-4 有効降雨の算定



(a) 平成16年5月17日出水



(b) 平成16年7月18日出水

図-5 有効降雨モデル導入の効果

本システムでは図-4に示すモデルを用いて有効降雨を算定した．各部分流域毎に，時々刻々の雨量に流出率 f を乗じて有効降雨とするが，直接流出に寄与しなかった損失降雨分についてはその累積をカウントしておき，その累積の大きさに応じて流出率を変動させた．これにより，洪水に先立つ前期降雨が大きいほど，流出率が大きくなる．損失雨量の累積は，1時間ごとに減衰率 α を掛けて，少しずつ減衰させ，その減衰分の一部は基底流量

分として河道モデルへの側方流入量に加え、残りは蒸発するものとした。この有効降雨モデルのパラメータは、流出計算結果が実績流入量に合うように設定した。

この有効降雨モデルを用いて流出計算を行った場合と、有効降雨モデルを用いず流出率一定として流出計算を行った場合の比較を図-5に示す。なお結果は実測雨量を用いた上で、カルマンフィルタによる実測流量のフィードバックを行わずに流出計算を実施し、流量を計算したものである。特に、雨量の大きい出水(b)において、有効降雨モデルが有効に働くことがわかる。

(2) 融雪に伴う基底流量変化の考慮

対象流域は豪雪地帯であり、黒部川の流量は春から夏にかけて融雪の影響を受けるが、本システムでは簡便化のため、融雪量を直接計算せず、基底流量を変化させることで考慮した。

基底流量は、流域からの流出高の実績に基づいて、図-6に示すように設定した。

この基底流量を付加して流出計算を行った場合と、付加せずに流出計算を行った場合の比較を図-7に示す。この結果は、カルマンフィルタによる実測流量のフィードバックを行いつつ予測した2時間先の流入量を連ねたものである。予測計算における将来時刻の雨量は実測雨量を用いた。(b)の出水においてはあまり大きな差はないが、(a)の出水においては計算が改善されていることがわかる。

夏季の出水に対する、融雪の相対的な影響は小さいと考えられるが、無降雨時の基底流量について7月頃まで融雪の影響が強く見られる。無降雨時に計算では流入量が殆ど無いにもかかわらず、実測流入量はある程度の流量がある場合、フィードバックにより計算をその実測流入量に無理に合わせることとなり、以降の予測計算の精度が著しく悪くなる。以上の理由から、季節に応じた基底流量を河道への側方流入量に付加した。

(3) ダム操作および発電所運用の考慮

流入量予測を行うためには、上流のダム放流量や発電使用水量について、現在時刻以降の値を、推定する必要がある。小屋平ダム、仙人谷ダムのダム放流量については、洪水時には原則的に放流量を流入量に等しくする操作が行われるため、各ダムの流入量の予測値マイナス発電使用水量をそれぞれのダム放流量とした。

黒部ダムバルブ放流量、各発電所の発電使用水量については、電力需要、保安上の理由などにより、その時に応じて人為的判断で決定される。このため、「黒部ダムバルブ放流量」および「黒四発電使用水量」については、現在時刻以降の数字を別途オペレータによりキーボードから入力する装置をシステムに付属し、都度入力できるようにした。また、運用実態を考慮して、黒三、新黒三、黒二、新黒二の各発電使用水量は、黒四の発電使用水量に従属して規定した。

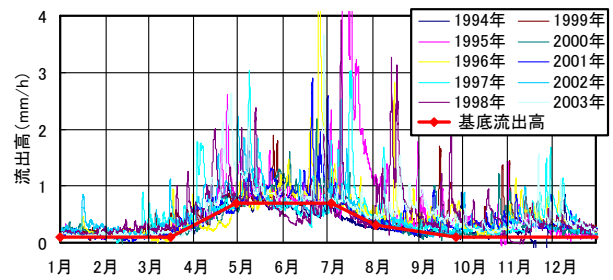
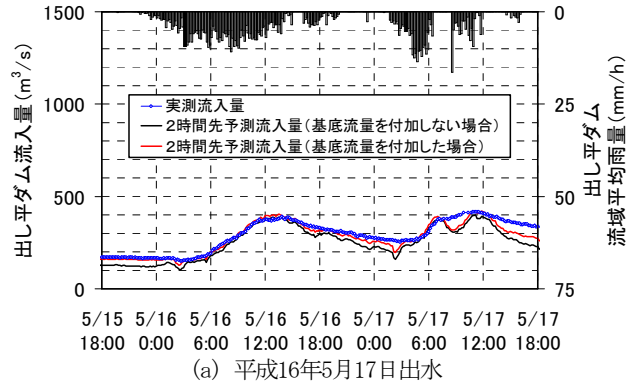
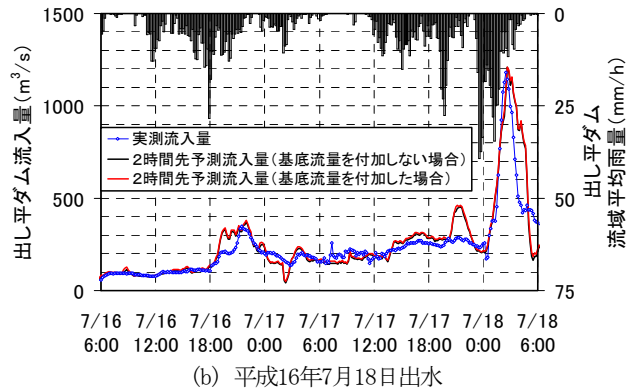


図-6 基底流量の設定



(a) 平成16年5月17日出水



(b) 平成16年7月18日出水

図-7 基底流量の付加の効果の比較

キーボードから入力がない場合、「黒部ダムバルブ放流量」は通常の維持放流量の値を用い、また、「黒四発電使用水量」は、現在時刻の発電使用水量の値が継続されるものとして計算を行うこととした。

(4) プログラミング

流出モデルのプログラミングにあたっては、高棹ら⁷⁾によって開発された水文モデル構築システムOHyMoSを用いた。OHyMoSは、斜面モデルや河道モデルといった要素ごとのモデルをプログラミングしておき、それらを組み合わせて全体のシミュレーションモデルを構成するモデリング方法(構造的モデリング)を支援するシステムである。有効降雨を算定するモデルや、発電所の取水・放水を扱うモデルの流出計算への付加も、OHyMoSを用いることにより、比較的容易に行うことができた。

また、本システムの予測結果は図-8に示すようにWeb画面化し、イントラネットを通じ、関西電力(株)の各事業所にてインターネットブラウザにより閲覧可能とした。

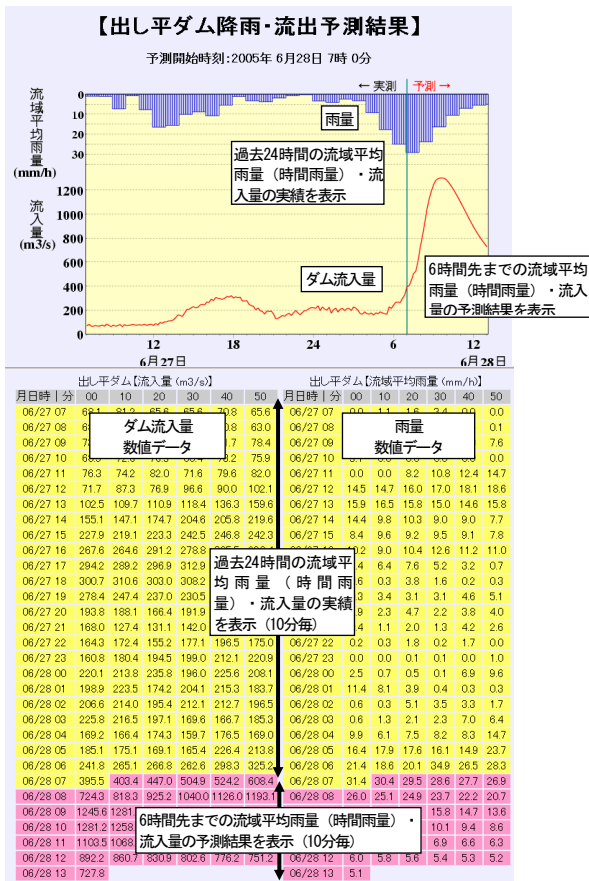


図-8 システム画面

5. 予測計算結果

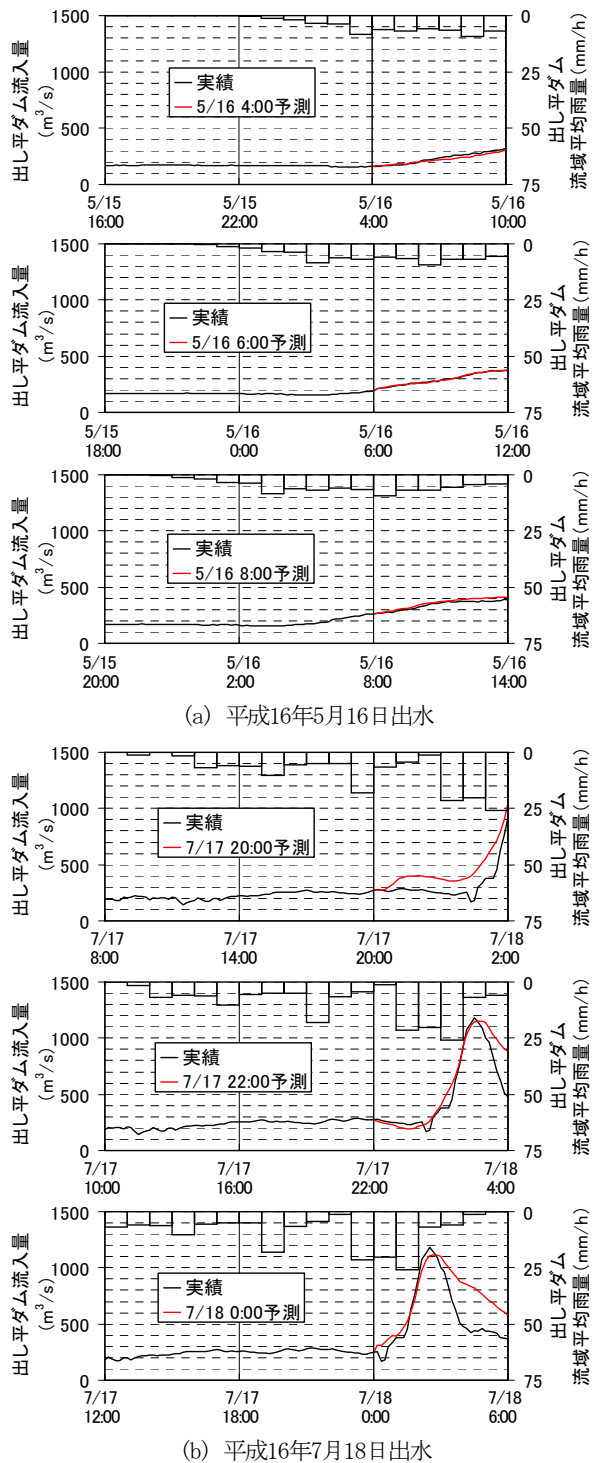
3ダムのうち、最下流に位置する出し平ダムの計算結果の例を図-9、図-10に示す。

図-9は、将来時刻の予測雨量として実測値を用いた場合のダム流入量の予測計算結果である。この計算は、雨量予測の誤差の影響を取り除いた、流出予測計算自体の精度を表すものであるといえる。

両事例共に出水の立ち上がり、ピーク値について良好な予測精度を確保していると評価できる。一方、ピーク時刻後の減速部の予測精度が劣っている。これは、発電専用である当ダムの操作においては洪水の立ち上がり時の予測の必要性が高く、このため、モデルの設定において、立ち上がりが実際の波形より遅れないことを重視したために、例えば図-4に示した有効降雨の設定が洪水減速部において大きめの値を与えることが一因であると推察される。また、斜面の流出モデルにおいて、斜面からの蒸発を考慮することにより、洪水減速部の予測精度が向上する可能性がある。

さらに、モデルの改良と別に、カルマンフィルタによるフィルタリングの対象を、現状の河道の流れの計算だけでなく斜面の流出計算まで広げ、斜面の状態量も随時推定し直すことで、予測精度向上の可能性がある。

次に、図-10に予測雨量を用いた場合のダム流入量の計算結果を示す。この結果は、実際に導入されたシステ



(a) 平成16年5月16日出水

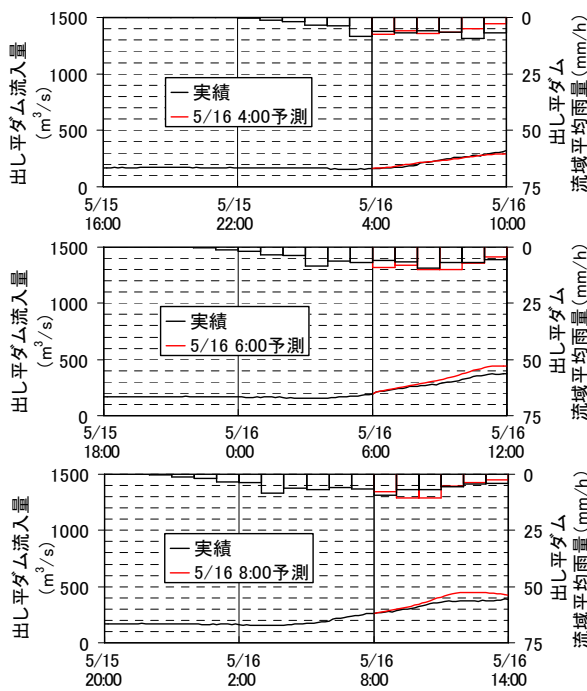
(b) 平成16年7月18日出水

- 計算条件：
- ・ 将来時刻の雨量 … 実測の雨量値を用いる。
 - ・ 将来時刻の黒部ダムバルブ放流量 … 実績値を用いる。
 - ・ 将来時刻の発電使用水量 … 実績値を用いる。

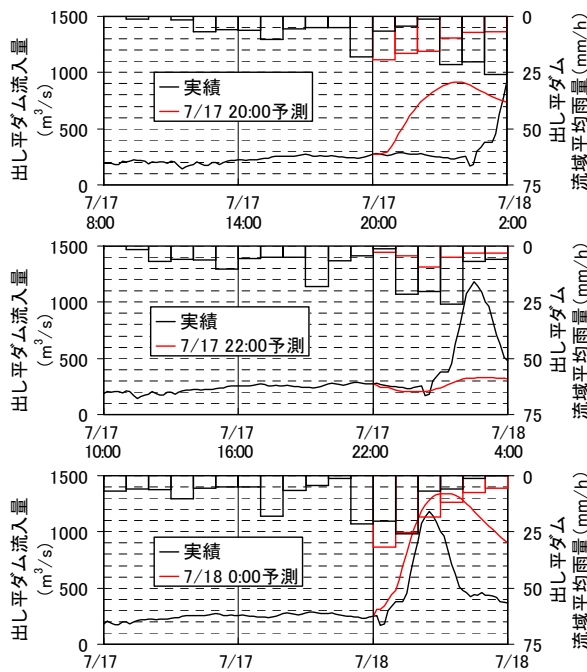
図-9 予測計算結果例 (1)

ムで表示される予測計算結果に相当する。

図-9と図-10の比較より、予測流入量は予測雨量に大きく影響を受けることがわかる。図-11は、これら予測流入量の二乗平均平方根誤差 (RMSE) を、雨量の予測誤差とあわせ、2出水について表したものである。



(a) 平成16年5月16日出水

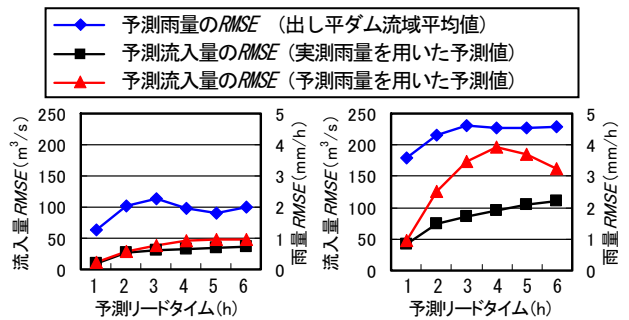


(b) 平成16年7月18日出水

計算条件：
 ・将来時刻の雨量 … 予測雨量を用いる。
 ・将来時刻の黒部ダムバルブ放流量 … 通常の維持放流量。
 ・将来時刻の発電使用水量 … 現在値を継続する。

図-10 予測計算結果例(2)

雨量の予測精度が良い(a)の出水においては、予測雨量に基づくダム流入量予測の精度も良い。しかし、雨の強弱の変化が大きい場合(b)は、雨量の予測誤差が大きくなり、ダム流入量予測も2時間先以降の予測において、その影響を受けた予測精度となる。



(a) 平成16年5月16日出水 (b) 平成16年7月18日出水
 (5/13 1:00~5/19 0:00における (7/16 1:00~7/20 0:00における
 10分毎予測データより算出) 10分毎予測データより算出)

図-11 予測流入量の精度比較

6. おわりに

以上、分布型流出モデルに基づく実時間流入量予測を実用のシステムとして構築、運用することができた。

今後の課題として、洪水通減部の予測精度向上が挙げられる。これは、近年被害を生じる例が多いピークが2以上の出水においては、1山目の洪水通減部の計算が2山目の予測に大きく影響するためである。このため、有効降雨モデルの改良や斜面からの蒸発の考慮、およびカルマンフィルタによるフィルタリングの対象を斜面モデルまで拡張すること等の検討を行い、洪水通減部の予測精度向上を図る予定である。

その他課題として、積雪・融雪モデルの計算の組み込みや、河川水位観測データの活用等が挙げられる。また、下流の宇奈月ダムまでの拡張、他河川流域への展開について検討する予定である。

参考文献

- 1) 藤田 暁, 大東秀光, 上坂 薫, 椎葉充晴, 立川康人, 市川 温 : 分布型流出モデルに基づくダム流入量実時間予測モデルについて, 水工学論文集, 第45巻, pp.115-120, 2001.
- 2) Hashimoto, N. and Kataoka, K.: Development of a system for operating the spillway gate for hydroelectric dams, Proc. of ICOLD -69th Annual Meeting Dresden, Vol.I, pp.293-313, 2001.
- 3) 橋本徳昭, 片岡幸毅 : 電力ダムの洪水吐ゲート操作に関するシステム開発, 大ダム, No.177, pp.65-75, 2001.
- 4) 片岡幸毅, 安岡恒人, 小久保鉄也, 高田望 : 急峻な山岳域を対象とした短時間降雨予測手法の開発, 電力土木, No.316, pp1-5, 2005.
- 5) 市川 温, 小椋俊博, 立川康人, 椎葉充晴, 宝 馨 : 山腹斜面流出系における一般的な流量流積関係式の集中化, 水工学論文集, 第44巻, pp.145-150, 2000.
- 6) 高棹琢馬, 椎葉充晴, 市川 温 : 分布型流出モデルのスケールアップ, 水工学論文集, 第38巻, pp.809-812, 1994.
- 7) 高棹琢馬, 椎葉充晴, 市川 温 : 構造的モデリングシステムを用いた流出シミュレーション, 水工学論文集, 第39巻, pp.141-146, 1995.

(2005. 9. 30受付)