

四国吉野川の池田ダム流域における利水運用のための分布型流出解析モデルの適用

HYDROLOGICAL RUNOFF ANALYSIS FOR WATER SUPPLY MANAGEMENT IN THE IKEDA DAM BASIN OF YOSHINO RIVER IN SHIKOKU ISLAND

津田守正¹・石塚正秀²
Morimasa TSUDA and Masahide ISHIZUKA

¹正会員 独立行政法人水資源機構 管理事業部管理企画課 (〒330-6008 さいたま市中央区新都心11番地2)
(前所属) 独立行政法人水資源機構 吉野川局企画調整課 (〒760-0018 高松市天神前10番1)

²正会員 博(工) 香川大学准教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 高松市林町2217番20)

A distributed hydrological model is applied to the Ikeda dam basin (1,904 km²) of Yoshino river in Shikoku Island in order to make the accuracy of the inflow rate into the dam high. The radar-AMeDAS composite precipitation data was used for the analysis. The results show that 1) the runoff model is applicable for the estimation of river water inflow, and 2) a simple data correction of the simulated data using observation data is useful for the prediction of the river water inflow. To apply the hydrological model for the water supply management in the Ikeda dam, data assimilation and model modification should be necessary.

Key Words : water supply management, runoff analysis, hydrological model, Yoshino river, Ikeda dam

1. はじめに

吉野川は総延長約194 km, 四国三郎の異名を持つ, 我が国でも有数の大河川である(図-1). その流域は四国四県にまたがり, 流域面積は3,750 km², 四国全域の約20%を占めている.

流域中流に位置する池田ダム(有効貯水容量: 440万m³)は, 都市用水や農業用水として利用されている香川用水や徳島用水を確保し, さらに, 流水の正常な機能を維持するために必要な流量が確保流量として定められている(図-2). このように池田ダムは吉野川における利水の基準地点となっている重要なダムである. 池田ダムの上流には早明浦ダム(有効貯水容量: 2億8,900万m³)があり, 池田ダムと連携した利水運用により, 四国の生活・産業に多大な恩恵を与えている. 通常, 池田ダムから早明浦ダムまでの流域内(以下, 上流域)の河川自流の流量が確保流量に満たない場合, その不足分を早明浦ダムから補給し, 確保流量を満足させている(図-2). しかし, 河川自流流量は時々刻々と変化するため, 早明浦ダムからの補給量も随時変更させる必要がある, このことが池田ダムの管理をより複雑にしている. 渡邊ら¹⁾は, 我が国の利水管理において, 下流基準点



図-1 吉野川流域と池田ダム上流域

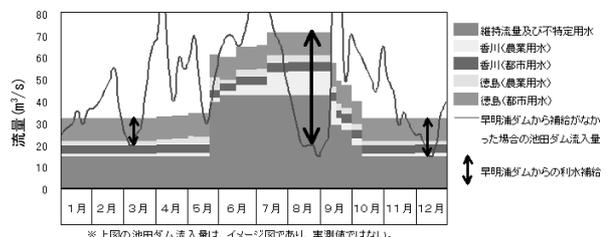


図-2 早明浦ダムからの利水供給イメージ

の必要流量に対するダムからの用水供給が過大であり, この理由として低水時のダム運用システムが整備されていないことを指摘している. この点に関して, 池田ダムでは, 24時間体制を執る交替勤務を行い, 早明浦ダムの

利水貯水量を有効に活用している。例えば、上流域に降雨があった場合には、河川自流入の増量分を勘案して早明浦ダムからの補給量を減量させている。この24時間体制の交替勤務を実施することにより、交替勤務を実施しない場合と比べて、早明浦ダムの利水貯水量が年間約2～3千万 m³温存される推定結果が示されている²⁾。この水量は早明浦ダムの有効貯水容量の約10%であり、中規模ダム1基の貯水容量に相当する量である。

現在、池田ダム上流域の河川自流入量の予測は、過去のデータに基づく経験的な手法をとっている。しかし、近年は降雨特性の変化が激しく、局地的な集中豪雨が増加傾向にあることから、より客観的な方法により、短時間の降雨による出水に対処する必要がある。そのためには、雨量や流出量の空間分布を考慮した流出解析による河川自流入量の推定が不可欠である。

これまでに、洪水時の河川管理には分布型流出解析モデルの適用が進められてきた。例えば、国土交通省は分布型流出解析モデルを用いた洪水時の流出予測の導入・運用に取り組んでいる³⁾。また、吉野川流域では、自治体の水防活動や避難行動を支援するため、分布型流出解析モデルによる流出予測を組み込んだ危険度表示システムが開発されている⁴⁾。このような治水面上におけるモデルの利用は数多く行われているが、今後は、利水面への利用も重要であると考えられる。

本研究は池田ダムの流入量の予測精度を向上させることを目的として、分布型流出解析モデルを池田ダム上流域に適用し、その適用性や課題について検討を行う。予測精度が向上すれば、早明浦ダムからの補給の要請をよりの確にかつ客観的に行うことができ、早明浦ダムの利水貯水量の効率的な利用促進と池田ダムの管理における人的負荷の抑制が期待される。

2. 池田ダムの利水運用

池田ダムの流域面積は1,904 km²であり、吉野川流域全体の約50%を占める。池田ダムの主要諸元を表-1に示す。早明浦ダムからの利水放流は、発電を通して行われる場合がほとんどであり、通常は電力需要の多い時間帯にピーク発電が行われるため、放流量の時間変化が大きい。この変化は、早明浦ダム下流約11 km地点にある山崎ダム（有効貯水容量：69万 m³）で平滑化されている（図-3）。しかし、山崎ダムの貯水容量には限りがあるため、完全な平滑化はできていない。

早明浦ダムからの放流量が池田ダムまで到達する時間は通常約12時間であることが経験的に知られており、池田ダムの管理においては、およそ半日後に到達する早明浦ダムからの放流量と上流域の河川自流入の流量の増減をあわせて予想し、それらが池田ダムの低水調節容量の範囲内で吸収できるように、早明浦ダムからの放流量を調

表-1 池田ダムの主要諸元

河川名	吉野川水系吉野川	流域面積	1,904 km ²
位置	徳島県三好市池田町	湛水面積	1.44 km ²
形式	重力式コンクリートダム	計画高水流量	11,300 m ³ /s
目的	F. N. A. W. I. P	洪水流量	5,000 m ³ /s

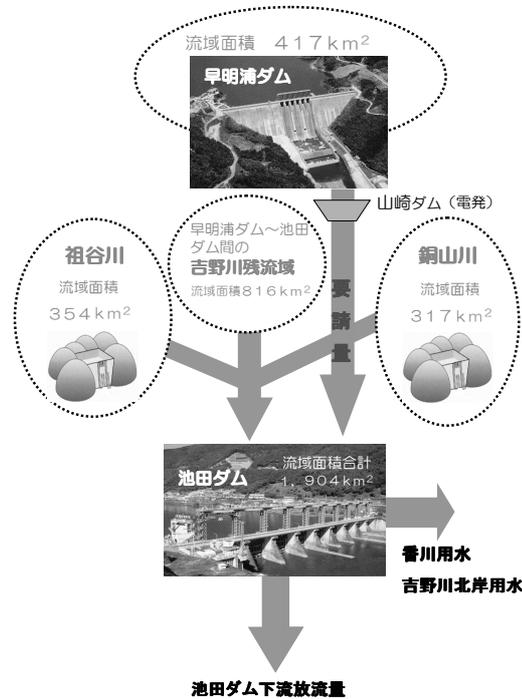


図-3 池田ダムの利水運用の模式図

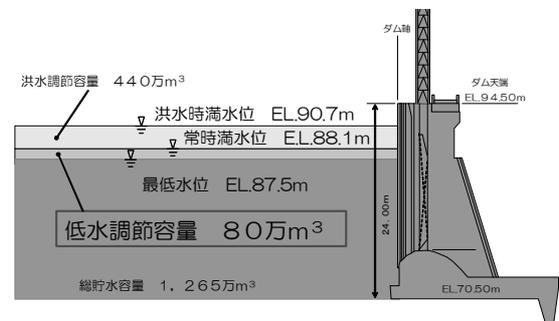


図-4 池田ダムの低水調節容量図

整している。池田ダムの低水調節容量は80万 m³であるが（図-4）、この量は池田ダムの流入量と比較すると非常に少なく、水位に換算するとわずか60 cmである。このため、池田ダム流入量の予測と管理には高い精度が求められる。

3. 分布型流出解析モデルの概要

(1) モデルの構成

本研究では、蒸発、浸透、斜面流出、河道流を同時に解く分布型水文流出モデル⁵⁾⁶⁾を用いた。図-5に示すよ

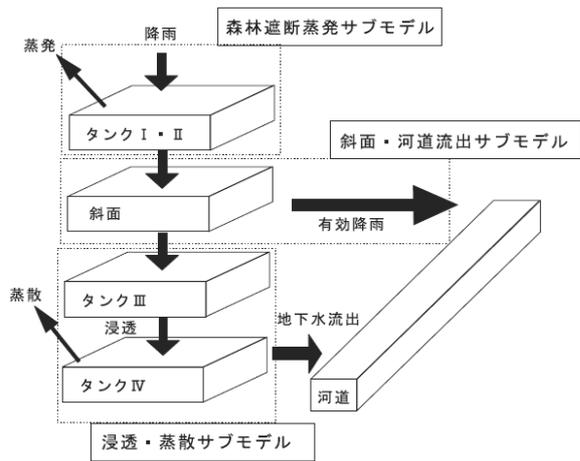


図-5 分布型水文流出モデルの構造図⁶⁾

うに、森林遮断蒸発サブモデルはグリッド上の降雨遮断を解き、浸透・蒸散サブモデルは降雨浸透および蒸散を解き、斜面・河道流出サブモデルは斜面および河道の流れを解く。対象流域を短形状の斜面に分割し、斜面境界に沿った河道および斜面において、雨水の移動を水理的に追跡する。斜面上で蒸発散量を計算し、有効降雨を求め、基底流出量を計算する。基底流出量は落水線にしたがって、一つ下流側の斜面および河道に接続される。

(2) モデルの領域

国土数値情報の標高データを用いて、流域のメッシュ化を行った(図-6)。メッシュサイズは、2 km×2 kmとした。池田ダム上流域の支川のうち、穴内川、南小川、立川川の3支川を考慮した。なお、早明浦ダム流域については、山崎ダムからの放流量データを直接入力することとしたため、領域から除外した。

(3) 計算条件

シミュレーション期間は、2005年1月1日1時からの1年間とした。初期条件はすべて0として、土地利用はすべて森林とした。主なモデルパラメータの値を表-2に示す。

雨量データには、気象庁のレーダー・アメダス解析雨量(流域内データ数：97地点)を用いた。位置補正と空間補間については、①一つの流出モデルのメッシュ位置に対して東西南北方向に最も近い4地点の雨量データを選定し、②各雨量データが流出モデルのメッシュ内に影響する範囲(面積)をそれぞれ求め、③当該メッシュに対する面積の比率を計算し、④その比率を重みとして雨量データに乗じて補間を行った。また、山崎ダム、ダム1・2からの放流量をダム位置において考慮した。

4. 出水の再現性の検討

(1) 誤差評価式

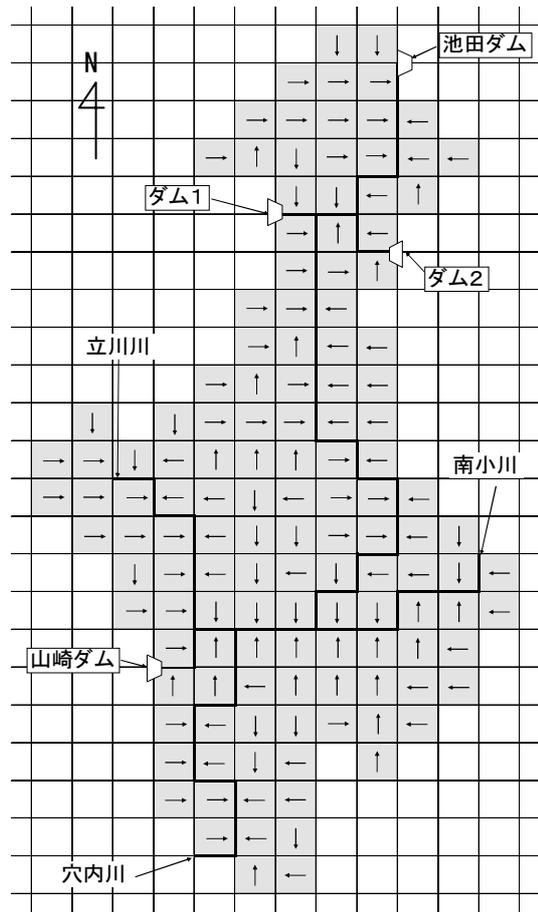


図-6 池田ダム上流域のモデル流域 (2 km×2 km)

表-2 モデルパラメータ

変数(単位)	記号	値
林地系表層部(タンクⅢ)の貯留定数(h)	K3	0.4
林地系表層部(タンクⅣ)の貯留定数(mm ^{9/10} h ^{1/10})	K4	250
基底流出の貯留べき定数	P2	0.08
A層厚(mm)	D	200
河道の粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	n	0.04
斜面の粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	n	0.5

分布型流出解析モデルによる出水波形の再現性を把握するため、9回の降雨イベント(各16日間、表-3)を対象として、池田ダムへの流入量の誤差評価を行った。なお、池田ダムの洪水流量は5,000 m³/sであるが、本検討ではピーク流量が1,000 m³/s以下の出水を対象とした。

誤差評価には、つぎに示す相対誤差E* (root mean square error (RMSE)の相対値)を用いた。

$$E^* = \frac{RMSE}{\bar{Q}_o} \quad (1)$$

ここで、 $RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^I (Q_o(i) - Q_m(i))^2 / I}$ 、であり、 \bar{Q}_o

は実績流量の期間平均値、 Q_o は実績流量、 Q_m はシミ

表-3 降雨イベントのタイプ分けと降雨特性 (2005年)

降雨番号	降雨タイプ	期間	降雨日数	流域平均累積雨量
Event1	A	3月 6日～3月21日	4日	32 mm
Event2	A	3月22日～4月 6日	7日	77
Event3	A	4月15日～4月30日	1日	27
Event4	B	5月 1日～5月16日	3日	63
Event5	A	6月 1日～6月16日	5日	55
Event6	C	7月 1日～7月16日	8日	205
Event7	B	8月19日～9月 3日	6日	90
Event8	A	10月10日～10月25日	2日	31
Event9	A	11月 3日～11月18日	2日	53

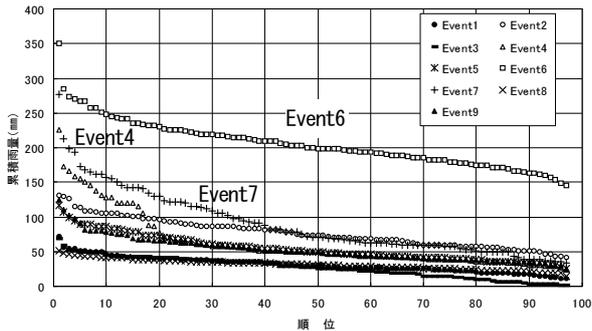


図-7 レーダー・アメダス解析雨量の空間分布 (観測点ごとの累積雨量が多い順に表記)

シミュレーション流量, i は時間, I は出水期間の総時間数を表す。

(2) 降雨特性の分類

雨量データから、降雨特性の分類を行った。各降雨イベントの特徴を表-3に示す。Events1, 2, 3, 5, 8, 9は、流域平均累積雨量がそれぞれ、32, 77, 27, 55, 31, 53 mmと少なく、また、観測点ごとの雨量の差が小さい点に特徴がある(図-7)。これをタイプAとする。Events4, 7は、流域平均累積雨量が63, 90 mmとやや多く、局地的な降雨である(図-7)。これをタイプBとする。Event6は、降雨日数が8日と長く、流域平均累積雨量が205 mmと非常に多い。これをタイプCとする。

(3) シミュレーション結果

各降雨イベントの相対誤差 E^* を図-8に示す。タイプAの場合、Event1を除くと E^* は0.3程度であり、再現性が良好であった。例えば、図-9に示したEvent2のハイドログラフをみると、出水時の流量の相違や立ち上がりの遅れがみられるものの、時間応答性や低減時の波形の増減が再現できている。

タイプBの場合、 E^* はタイプAの降雨の場合と比べて大きくなった(図-8)。このことから、レーダー・アメダス解析雨量を用いたとしても、局所的な降雨では、タイプAのような空間一様な降雨の場合と比較すると流出解析の誤差が大きくなるのが分かった。ここで、図-

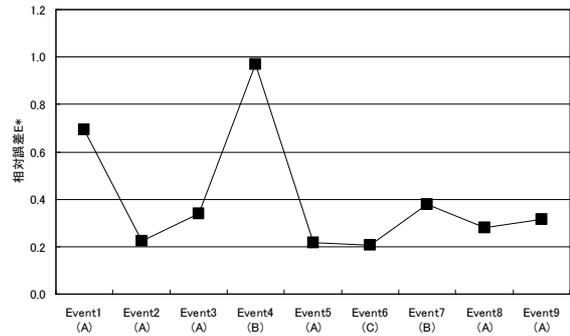


図-8 降雨特性毎のシミュレーション精度の比較

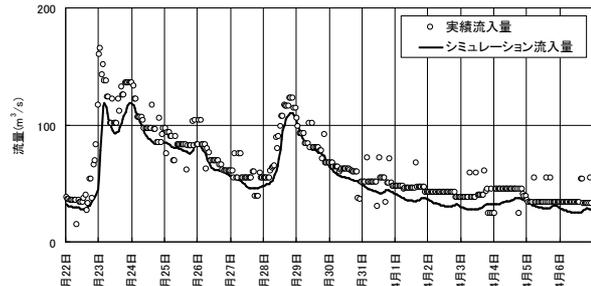


図-9 池田ダム流入量の比較 (Event2, タイプA)

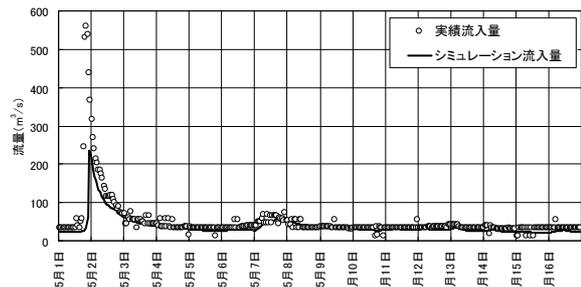


図-10 池田ダム流入量の比較 (Event4, タイプB)

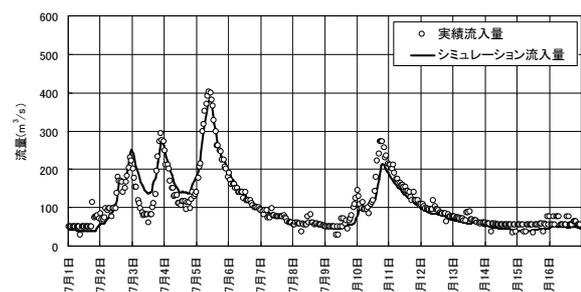


図-11 池田ダム流入量の比較 (Event6, タイプC)

10をみると、ピーク時のシミュレーション流量が過小となっており、これが E^* の増加に影響を与えたと考えられる。

タイプCの場合、図-11に示したように、流入量の増減が大きいが、それらの変動をよく再現できている。図-7をみると流域全体として雨量は多いが局地性は大きくないことがわかる。よって、 E^* はタイプAと同程度であり、良好な結果が得られた。

以上のことから、上流ダムからの放流量を考慮した分布型流出解析モデルを用いることで、出水時および低減時の池田ダムの流入量の変化を概ね再現できることが分かり、池田ダム上流域における自流流量（池田ダムの流入量）の予測が可能である結果が示された。

5. 利水運用へのモデル適用の可能性の検討

(1) 分布型流出解析モデルの適用事例

本章では、分布型流出解析モデルによる予測結果を池田ダムの利水運用に活用できるかどうかについて、つぎに示す2つの用途に対して、モデル適用の可能性を検討する。

① 池田ダム上流域からの自流流量の予測

池田ダムの確保流量を満足するために必要となる早明浦ダムからの補給量を決定するために、分布型流出解析モデルにより、降雨期間中の自流流量の変化を予測する。

② 池田ダムの貯水位変動の予測

分布型流出解析モデルにより求めた池田ダムの流入量を用いて、池田ダムの貯水位変動を予測する。

(2) 池田ダム上流域からの自流流量の予測結果の検討

池田ダム上流域からの自流流量には実測値が無いことから、実管理においては2日程度先までの日平均流入量の予測を目安として、早明浦ダムからの放流量を検討している。なお、最終的には、池田ダム貯水位の変動が低水調節容量の範囲内に収まることを確認した上で早明浦ダムからの放流量は決定される。そこで、本検討では、分布型流出解析モデルの結果を用いて自流流量の予測を行う際に、基準となる日より2日先（当日を含めて72時間先）までの池田ダムの流入量の再現性を確認することとする。

実運用において分布型流出解析モデルの結果を使用する場合に、予測開始時刻までに得られている実績流入量を参照して、シミュレーション流量の補正を行うことを考えた。本研究では構築したモデルの適用性の把握と課題の抽出を目的としているため、補正には簡便な方法を採ることとした。つまり、当日0:00時点の実績流量とシミュレーション流量との差異を計算し、その値をシミュレーション流量に一律に加えることにした。

上述の方法で求めた予測流入量を図-12に示す。補正前のシミュレーション流量を太い点線で示し、補正後のシミュレーション流量を細い実線で示す。ここで、シミュレーション流量の補正は、1日1回0:00に更新するという運用を想定して、各日0:00に補正した。その結果、実績値を用いてシミュレーション結果を補正することで、低水時における予測値が補正前と比較して実績値とよく一致する結果が得られた。ただし、図-12中の点A・Bのように、出水時においては本補正方法では誤差が大き

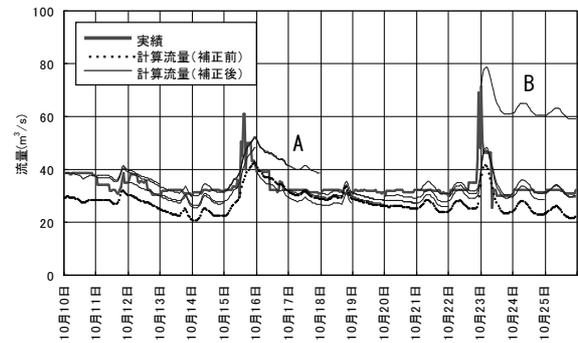


図-12 補正による池田ダムの流入量の予測結果
(Event8, 各日の0:00から2日先までを予測)

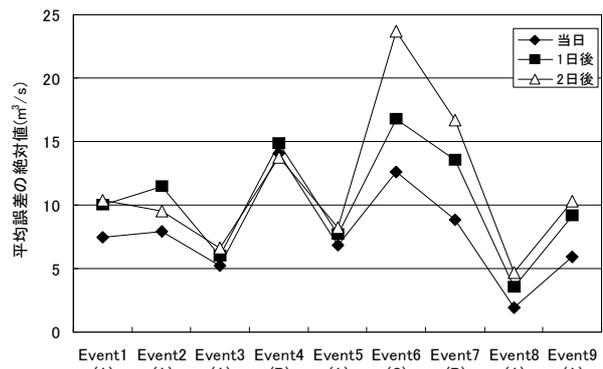


図-13 池田ダム地点における日流入量の誤差

なる。なお、貯水位の実績値から池田ダムの流入量を求める際に、貯水位観測の計測分解能が粗いため、実績データがスパイク状に変動するが、図-12では平滑化して表示している。

予測結果の精度を定量的に検討するため、予測時点に対して当日、1日後、2日後の池田ダムの流入量について実績値と予測値との差を算出した。結果を図-13に示す。なお、図の縦軸は降雨期間中の平均値を示す。タイプAの降雨の場合でも、実績流入量と予測流入量には2~10 m³/sの誤差があり、タイプBの場合では10~15 m³/sの誤差が生じた。一方、池田ダムからの実際の放流量は、通常時には規定量+0.5 m³/s以内、渇水時には+0.1 m³/s以内におさまるように運用されている。そのため、流入量の予測にも同程度の精度が必要であるが、分布型流出解析モデルによる誤差は大きい結果となった。

つぎに、予測時間と精度との関係を見ると、当日の誤差が1日後、2日後の予測と比べて小さいことが分かった。その理由は、基準時点の実績流入量と予測流入量が一致するように予測流入量を単純に増減させたためと考えられる。しかし、タイプAのEvents 3, 5, 8では、予測時間が長くなっても誤差が変化していないことから、雨量が少なく、空間一様な降雨に対して本補正方法はとくに有効であることが分かった。なお、実時間での流量補正については、各種の方法が提案されており、例えば、角屋ら⁷⁾は実測流量と計算流量が適合するように、雨量と蒸

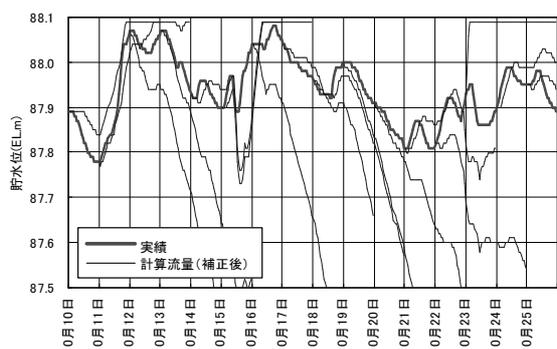


図-14 池田ダムの貯水位の予測結果
(Event8, 各日の0:00から2日先までを予測)

発散量を増減させる状態修正法を提案している。実運用に対しては、簡便で精度の高い実用的な補正方法の適用を検討する必要がある。現状では、構築した分布型流出解析モデルによる流入量予測精度は、従来の経験的な手法よりも劣るため、補正方法を含めたモデル全体の改良も必要である。また、one wayモデルではなく、予測結果をアシミレーションして、つぎの時間の予測精度の向上につなげるtwo wayモデルも有用である。

(3) 池田ダム貯水位変動の予測結果の検討

前節で示した補正後の池田ダム流入量の予測値（0:00を起点とした2日後）を用いて池田ダムの貯水位を推定し、その再現性を検討した。なお、池田ダムの貯水位は、流入量予測値、実績放流量、および貯水位-貯水容量関係の3つのデータを用いて推定した。

Event8における池田ダム貯水位の予測結果を図-14に示す。図-13に示したようにEvent8のダム流入量は、他の降雨イベントと比べて誤差が小さいにも関わらず、貯水位の変化を十分に再現できていない結果が示された。とくに、出水初期の段階で、シミュレーション貯水位が実績貯水位に比べて急激に低下している。この理由は、出水初期の池田ダム流入量の立ち上がりを実際よりもやや遅れる傾向にあるためと考えられる。例えば、池田ダムでは、流入量に $1\text{ m}^3/\text{s}$ の誤差がある場合、貯水位は約7cm変化するため、わずかの流量の差異が水位に大きく影響することが分かった。池田ダムの水位調整範囲が60cmであることを考えると、貯水位の変動を再現するには、ダム流入量の推定精度を高める必要がある。

6. まとめ

四国吉野川流域の池田ダムの流入量の予測精度を向上させることを目的として、池田ダム上流域を対象とした分布型流出解析モデルによる河川流出解析を行い、モデルの適用性および池田ダムの利水運用に活用する際の課題について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 上流ダムからの放流量を考慮した分布型流出解析モデルを用いることで、出水時および低減時の池田ダムの流入量の変化を概ね再現できることが分かり、池田ダム上流域における自流流量（池田ダムの流入量）の予測が可能である結果が示された。
- 2) レーダー・アメダス解析雨量を用いたとしても、局所的な降雨では、空間一様な降雨の場合と比べると流出解析の誤差は大きくなることが分かった。
- 3) 実測流量を用いたシミュレーション流量の補正がダム流入量の予測に対して有効である。とくに、雨量が少なく、空間一様な降雨に対しては単純な補正であっても有効であることが分かった。

また、池田ダムの貯水位管理に分布型流出解析モデルを用いる際の課題について、以下にまとめて示す。

- 1) 池田ダムの流入量の推定精度をより高めるために、簡便で実用的な補正方法の検討が必要である。
- 2) one wayモデルではなく、予測結果をアシミレーションして、つぎの時間の予測精度の向上につなげるtwo wayモデルも有用である。
- 3) 池田ダムの貯水位の変動を再現するには、池田ダム流入量の推定精度を高める必要がある。
- 4) モデルの実用化のためには、観測雨量予測雨量のリアルタイム取り込みや、計算流量のリアルタイム補正を組み込んだシステム化設計が必要である。

謝辞：本論文は香川大学と水資源機構吉野川局との共同研究（代表：石塚正秀）の成果の一部をとりまとめた。

参考文献

- 1) 渡邊浩, 虫明功臣：効率的な利水操作と下流河道の生態系保全のためのダム貯水池の低水管理, 水文・水資源学会誌, Vol.19, No.2, pp.108-118, 2006.
- 2) 四宮弘智, 播磨光一, 佐藤勝：池田ダム交替勤務の評価について, 平成20年度(第42回)水資源機構技術研究発表会資料集, pp.81-90, 2008.
- 3) 国土交通省：地方整備局の水災害予報センターについて, http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000144.html.
- 4) 猪俣広典, 深見和彦：吉野川流域広域水危険度判断支援システムの開発, 河川技術論文集, Vol.13, pp.433-438, 2007.
- 5) 石塚正秀, 江種伸之：農業用取水ルールを考慮した分布型水文流出モデルによる紀の川流出解析, 水工学論文集, 第52巻, pp.391-396, 2008.
- 6) 石塚正秀, 吉田秀典, 宮崎孟紀：レーダー・アメダス解析雨量を用いた中規模河川流域の流出解析と降雨特性分類に基づく検証, 土木学会論文集(B), Vol.66, No.1, pp.35-46, 2010.
- 7) 角屋睦, 田中丸治哉, 安田史生：長短期流出両用モデルによる実時間的湯水予測, 農業土木学会論文集, No.177, pp.43-50, 1995.

(2010. 4. 8受付)