

## 渇水時貯水池操作における長期確率流量情報の利用性に関する一考察

### Impact Analysis of Long-term Stochastic Inflow Prediction and Its Uncertainty on Reservoir Operation during Drought Situation

野原大督・三木博子<sup>(1)</sup>・堀智晴

Daisuke NOHARA, Hiroko MIKI<sup>(1)</sup> and Tomoharu HORI

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

#### Synopsis

Impacts of long-term stochastic inflow predictions (SIPs) and their uncertainties on reservoir operation for water supply under drought situations are analyzed and discussed in this study. Multiple sets of SIPs are pseudo-randomly generated with five-day resolution for three months arbitrarily changing the two kinds of prediction's uncertainty, namely reliability and discrimination, for a comprehensive analysis of the impact of the SIP. Monte Carlo simulations of long-term reservoir operation for water supply under drought situations are then conducted considering generated multiple SIPs with various uncertainties. Proposed analyzing method was applied to an assumed reservoir which data was derived from Sameura Reservoir in Japan, demonstrating expected impacts of SIPs and their uncertainties on the long-term reservoir operation, and giving a suggestion what type of uncertainty in SIP is more important in real-time reservoir operation for more effective drought management.

**キーワード:** 利用性分析, 確率流入量予測, 渇水時貯水池操作, 不確実性指標, モンテカルロシミュレーション

**Keywords:** impact analysis, stochastic inflow prediction, reservoir operation for drought management, uncertainty index, Monte Carlo simulation

#### 1. はじめに

ダム貯水池は, 下流の水需要と自然からの水供給とのギャップを埋めるように放流を行うことによって河川流況を調整することで, 渇水管理において重要な役割を果たす. 対象河川流域において今後予想される気象・水文状況を考慮した効率的な貯水池操作手が, 効果的な渇水管理のためには不可欠である.

将来の気象・水文状況に関する情報の一つとして, 向こう数か月程度における降水量や流入量などの水文量に関する長期確率予測情報が, 近年, 各国の気

象当局から提供されている. Krzysztofowicz (2012)は, こうした確率水文予測情報を意思決定において利用する4つの利点を挙げている. すなわち, 確率予測情報は, 1) 科学的により誠実 (honest) であること, 2) 洪水のような水災害についてリスク論的な警告を提供できること, 3) より合理的な意思決定を行うことを支援できること, 4) 確率予測情報を分析することによってさらに付加的な経済価値を得ることができる可能性があること, である.

今後数か月間の水文量に関する長期確率予測情報は, 長期貯水池操作における意思決定にとっても

有用であると考えられる。なぜなら、こうした確率予測情報には、将来の水文量の期待値だけではなく、その予測情報が持つ不確実性に関する情報も含まれており、こうした情報が、決して決定論的に見通すことのできない長期の将来における水需給の状態について様々な可能性を考慮する必要のある長期貯水池操作にとって、非常に役立ち得ると考えられるからである。このような観点から、長期貯水池管理において予測情報の不確実性に関する情報を含んだ決定論的でない水文予測情報を利用しようとする多くの研究がなされてきている (Kelman et al., 1990; Karamouz and Vasiliadis, 1992; Faber and Stedinger, 2001; Kim et al., 2007; Georgakakos and Graham, 2008; Gong et al., 2010; Pianosi and Ravazzani, 2010; Zhao et al., 2011)。

しかし、貯水池の実管理現場の放流意思決定において、確率水文予測情報はこれまで必ずしも十分に考慮されてきてはいない。これは、様々な不確実性を有する確率水文予測情報を長期貯水池管理において考慮した場合に、貯水池操作に関する意思決定がどの程度改善し得るのか、あるいは、予測情報を考慮することによって逆にどの程度のリスクを負うことになるのか、系統だった分析が行われていないことが一因であると考えられる。こうした状況を克服するためには、長期貯水池操作における確率水文予測情報の利用性に関する網羅的な分析を実施することが必要となる。Nohara and Hori (2012)では、確率予測情報の不確実性に関する二種類の指標を導入しながら、確率流況予測情報を水補給のための長期貯水池操作において考慮する場合に、予測情報の不確実性が操作意思決定の精度に及ぼす影響について分析を行っている。ここでは、利水操作精度が年間平均の渇水被害によって評価されている。一方で、実時間での渇水管理にとってより役立ち得る情報を得るためには、渇水が実際に生起している場合において、確率予測情報が利水放流決定や渇水の緩和にどの程度貢献し得るのか、また、確率予測情報に含まれる不確実性が利水放流決定にどのような影響を及ぼすのかについても、検討を行うことが重要である。

そこで、本稿では、様々な程度の不確実性を有する長期確率流入量予測情報の渇水時における利水放流意思決定への利用性を、確率流入量予測情報の不確実性がダム利水操作精度に及ぼす影響と合わせて分析する。

## 2. 分析の方法

### 2.1 概要

本研究では、Nohara and Hori (2012)で開発した利水

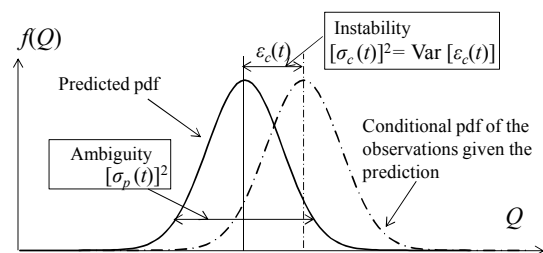


Fig.1 Concepts of uncertainty contained in stochastic predictions

操作における確率流況予測情報の利用性分析手法を基に、確率流入量予測情報の渇水時利水補給意思決定における利用性分析のためのモンテカルロシミュレーションモデルを構築する。まず、向こう3か月先までの5日単位の確率流入量予測情報を模擬発生させる。その際、対象ダム貯水池の流入量の真値に対して任意の誤差や曖昧性を持つように確率流入量予測情報を模擬発生させる。渇水時の利水操作に対する確率流入量予測情報の利用性を検討するため、Nohara and Hori (2012)とは異なり、ここでは、流入量の真値としては、実際に対象とするダム貯水池において観測された過去の低流況を考える。続いて、模擬発生させた確率流入量予測情報を考慮した利水放流の最適化を、確率的動的計画法(確率DP)を用いて行い、向こう3か月先までの5日単位の最適放流戦略を決定する。得られた最適放流戦略に従って、利水操作を5日単位で行う。ただし、予測情報の更新、すなわち、3か月先までの新たな確率予測情報の模擬発生を5日ごとに行うので、予測を更新する度に最適放流戦略を算出し直ししながら、最新の最適放流戦略に従って利水放流を行う。利水操作における確率流入量予測情報の利用性の分析は、渇水期間における上記の利水放流決定に関するシミュレーションをモンテカルロシミュレーションとして多数行い、それらの結果を総合することによって行う。さらに、確率流入量予測情報の不確実性に関する属性を変更させながら、上記のシミュレーションを繰り返し多数行うことによって、様々な不確実性を有した確率流入量予測情報の渇水時利水操作における利用性分析を実施する。

### 2.2 確率流入量予測情報の不確実性

確率流入量予測情報は予測対象期間内の各時点における流入量の真値に誤差確率分布を加えることで模擬発生する。誤差確率分布の確率分布は平均が0の正規分布であると仮定する。そのため、予測確率分布は平均が真値の正規分布となる。確率流入量予測情報の模擬発生にあたっては、確率予測情報の不

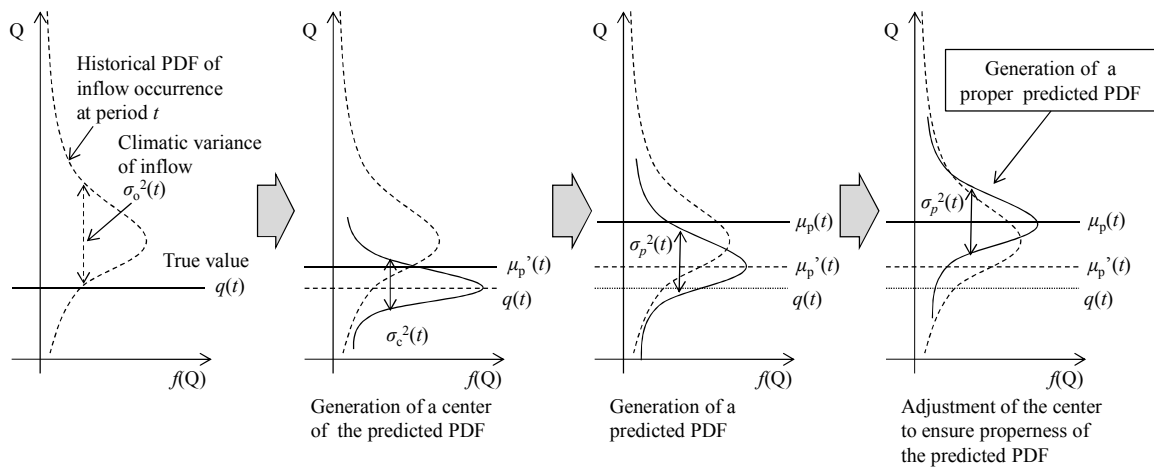


Fig.2 Schematic flow diagram for generation of stochastic inflow prediction for period  $t$

確実性に関する二つの属性を考慮する．一つは予測の不安定性であり，もう一つは予測の不明瞭性である (Fig.1 参照) .

確率予測情報の不安定性は，予測確率分布と予測が出された下での真値の条件付き確率分布との対応がどの程度安定しているかという性質に関連付けて考えることができる．本研究では，予測確率分布の中心（平均）と予測が出された下での真値の条件付き正規確率分布の中心との差をもって，両者の確率分布の対応と定義し，この差の分散を確率予測情報の不安定性を測る指標と考える．一方，予測情報の不明瞭性については，予測確率分布の幅，すなわち，予測される範囲がどの程度限定されているかによって表現できると考え，確率予測分布の分散をその確率予測情報の不明瞭性を測る指標として考える．

予測確率分布と予測情報が与えられた下での真値の条件付き確率分布の平均的な差，すなわち，バイアス (bias) も，確率予測情報の不確実性に関する重要な指標であると考えられるが，バイアスは予測情報に関する統計情報が既知であれば，比較的容易に補正できるため，本研究ではすでにバイアス補正がなされているものとして，これを考慮しないことにした．

### 2.3 様々な不確実性を有した確率予測流入量情報の模擬発生

前節で述べた二つの重要な不確実性に関する属性を制御しながら，以下の手順で確率流入量予測情報を模擬発生させる (Fig.2を参照) .

まず，予測確率分布の中心（平均値）を，予測確率分布の中心が従う正規確率分布  $N(\mu_c(t), [\sigma_c(t)]^2)$  からのランダムサンプリングにより模擬発生させる．予測確率分布の中心の確率密度関数は次式のように

なる．

$$f_{\mu_p}(\mu_p'(t)) = \frac{1}{\sigma_c(t)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{\mu_p'(t) - \mu_c(t)}{\sigma_c(t)}\right\}^2\right] \quad (0 < \mu_p'(t) < \infty) \quad (1)$$

ここに， $\mu_p'(t)$ は期間 $t$ における予測確率分布の中心としてサンプルされた値， $\mu_c(t)$ は第 $t$ 期の予測確率分布の中心が従う正規確率分布の平均である．なお，本研究では，確率予測情報のバイアス補正は既になされたものとするので， $\mu_c(t)=0$ である． $\sigma_c(t)$ は第 $t$ 期の予測確率分布が従う正規確率分布の標準偏差で，次式によって定義される (Fig.1を参照) .

$$[\sigma_c(t)]^2 = \text{Var}[\varepsilon_c(t)] = C_c^2[\sigma_o(t)]^2 \quad (2)$$

ここに， $\sigma_o(t)$ は第 $t$ 期における過去の観測流量から求められる標準偏差， $\varepsilon_c(t)$ は第 $t$ 期における予測確率分布の中心と予測が与えられた下での真値の条件付き確率分布の中心との差， $C_c$ は確率予測情報の不安定性を表す指標で，観測流量の標準偏差 ( $\sigma_o(t)$ ) に対する  $\sigma_c(t)$  の比として定義される指標である．この定義によって， $C_c$ が大きくなるほど予測確率分布が予測が与えられた下での条件付き確率分布から遠ざかりやすくなるように，確率予測情報の不安定性を調節できる．反対に  $C_c$ が小さいほど，予測確率分布が事後の真値の生起確率分布に近づきやすくなり，予測の信頼性が増すことになる． $C_c=0$ ，すなわち， $\sigma_c(t)=0$ の場合は，確率予測情報は完全な確率予測情報となり，予測確率分布と予測が与えられた下での真値の条件付き生起確率分布は完全に一致する．

次に，以上の操作によって模擬発生された予測確

率分布の中心の位置を調整する。調整は、平均が $\mu_p^*(t)$ 、標準偏差が予測確率分布の標準偏差 $\sigma_p(t)$ と同じである正規分布 $N(\mu_p^*(t), [\sigma_p(t)]^2)$ から再度ランダムに値をサンプリングし、サンプリングされた値 $\mu_p(t)$ を予測確率分布の中心の位置とすることで行う。この操作によって、 $C_c=0$ の場合に、予測確率分布と予測が与えられた下での真値の条件付き生起確率分布が一致する性質を確保することができる。逆に、この操作を行わなければ、予測確率分布の中心が常に真値に相当することになってしまう。最終的に、第 $t$ 期の流入量の予測確率分布は、この新たにサンプリングされた $\mu_p(t)$ を中心とした標準偏差 $\sigma_p(t)$ の正規確率分布として与えられ、次式のように定義される。

$$f_p(q^*(t)) = \frac{1}{\sigma_p(t)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{q^*(t)-\mu_p(t)}{\sigma_p(t)}\right\}^2\right] \quad (0 < q^*(t) < \infty) \quad (3)$$

ここに、 $q^*(t)$ は第 $t$ 期における予測流入量であり、 $\mu_p(t)$ は調整後の予測確率分布の中心となる。また、予測確率分布の標準偏差 $\sigma_p(t)$ は、次の式によって定義される (Fig.1を参照)。

$$[\sigma_p(t)]^2 = C_p^2 [\sigma_o(t)]^2 \quad (4)$$

ここに、 $C_p$ は確率予測情報の不明瞭性を表す指標で、観測流量の標準偏差 ( $\sigma_o(t)$ ) に対する $\sigma_p(t)$ の比として定義される。この定義によって、 $C_p$ が大きくなるにつれて予測確率分布の幅が大きくなり、予測情報がより曖昧になるように、確率予測情報の不明瞭性が調節できる。また、 $C_p=0$ の場合には確率予測情報の分散が0となり、予測情報は決定論的予測となる。流入量確率予測値は、予測が実施される度に、上記の手順に従いながら、予測対象期間内の各時点について模擬発生する。このとき、任意の組み合わせの $C_c$ と $C_p$ を設定することによって、様々な不確実性を持った確率流入量予測情報を模擬発生することができる。

$C_c$ と $C_p$ に任意の非負の値を割り当てることができるが、気候値のみに基づく将来予測と比べて予測情報を価値のあるものとするためには、少なくとも $[\sigma_c(t)]^2 + [\sigma_p(t)]^2 \leq [\sigma_o(t)]^2$ 、すなわち、 $C_c^2 + C_p^2 \leq 1$ の条件を満たす範囲で、それぞれの値を割り当てる必要がある。これは、確率予測情報に含まれる分散が、流入量の気候学的分散 $[\sigma_o(t)]^2$ を超えてしまえば、流入量の気候値に基づいて将来の状況を判断した方が期待できる精度が良いことになり、予測としてはもはや意味がないからである。

## 2.4 貯水池操作

模擬発生させた $L$ 期先までの確率予測情報を用いて、ダム貯水池からの利水放流の決定を行うことを考える。利水放流の最適化計算は、確率DPを用いて予測期間である $L$ 期先までを対象に行う。利水操作の目的は流況評価地点における渇水被害の最小化と設定し、渇水被害を算出するための被害関数には、次のものを用いる。

$$\min_{R_{\min}^* \leq r_t \leq R_{\max}^*} \sum_{t=1}^{T_{opt}} E[H_t(w_t)] \quad (5)$$

$$R_{\min}^* = \max\{R_{\min}, S_t + q_t^* - S_{\max}\} \quad (6)$$

$$R_{\max}^* = \min\{R_{\max}, S_t + q_t^* - S_{\min}\} \quad (7)$$

ここに、 $r_t$ は第 $t$ 期の放流量、 $T_{opt}$ は最適化計算の期間数で本研究では予測期間 $L$ と同値、 $w_t$ はダム下流の流況評価地点における第 $t$ 期の河川流量、 $q_t^*$ は第 $t$ 期のダム流入量、 $R_{\min}$ と $R_{\max}$ はそれぞれ対象ダムの操作ルールや物理的制約によって定められる最小放流量および最大放流量、 $S_{\min}$ と $S_{\max}$ は同様にそれぞれ対象ダムの操作ルールや物理的制約によって定められる最小貯水量および最大貯水量である。 $H_t(w_t)$ は、第 $t$ 期において流況評価地点における河川流量が $w_t$ であった場合に水不足によって生じる渇水被害で、次式によって定義される (池淵ら, 1990)。

$$H_t(w_t) = \{\max(d_t - w_t, 0)\}^2 / d_t \quad (8)$$

ここに、 $d_t$ は第 $t$ 期における水需要、すなわち流況評価地点における必要流量である。一方、第 $t$ 期における貯水量状態 $s_t$ に対応する将来被害関数は次式によって定められる。

$$f_t(s_t) = \min_{R_{\min}^* \leq r_t \leq R_{\max}^*} E\left\{H_t(w_t) + E\left[f_{t+1}(s_{t+1})\right]\right\} \quad (9)$$

$$(s_{t+1} = s_t + q_t^* - r_t)$$

なお、本研究では、予測対象期間内のすべての時点に対する予測確率分布が与えられることから、流況の遷移確率 (マルコフ性) は考えない。また、 $T_{opt}=L$ 以降に想定される渇水被害については、貯水池の各状態から1年先まで平均的な流況が得られた場合に想定される積算被害の値をあらかじめ計算しておいたものを用いる。

Table 1 Simulated results of averaged drought damage over the simulated period in 1994

Initial storage (%)	Case 1 (m <sup>3</sup> /s)	Case 2 (m <sup>3</sup> /s)	Case 3 (m <sup>3</sup> /s)	Case 4 (m <sup>3</sup> /s)	Case 5 (m <sup>3</sup> /s)	Difference (m <sup>3</sup> /s)	Rate of difference (%)
20	5.280*	4.990	4.817	4.734	4.674 <sup>†</sup>	0.607	11.5
40	2.725*	2.450	2.262	2.174	2.113 <sup>†</sup>	0.613	22.5
60	0.639*	0.515	0.433	0.421	0.420 <sup>†</sup>	0.219	34.3
80	0.066	0.064 <sup>†</sup>	0.099	0.109	0.142*	0.078	55.0
100	0.019 <sup>†</sup>	0.023	0.073	0.085	0.118*	0.100	84.4

\*Maximal damage over cases with each initial storage; <sup>†</sup>minimal damage over cases with each initial storage.

Table 2 Simulated results of averaged drought damage over the simulated period in 2005

Initial storage (%)	Case 1 (m <sup>3</sup> /s)	Case 2 (m <sup>3</sup> /s)	Case 3 (m <sup>3</sup> /s)	Case 4 (m <sup>3</sup> /s)	Case 5 (m <sup>3</sup> /s)	Difference (m <sup>3</sup> /s)	Rate of difference (%)
20	6.416*	6.209	6.128	6.092	6.028 <sup>†</sup>	0.387	6.0
40	3.292*	3.070	2.920	2.866	2.812 <sup>†</sup>	0.480	14.6
60	0.781*	0.650	0.562	0.527	0.503 <sup>†</sup>	0.278	35.6
80	0.018 <sup>†</sup>	0.020	0.044	0.056	0.086*	0.069	79.7
100	0.011 <sup>†</sup>	0.014	0.039	0.050	0.082*	0.071	86.5

\*Maximal damage over cases with each initial storage; <sup>†</sup>minimal damage over cases with each initial storage.

Table 3 Simulated results of averaged drought damage over the simulated period in 2008

Initial storage (%)	Case 1 (m <sup>3</sup> /s)	Case 2 (m <sup>3</sup> /s)	Case 3 (m <sup>3</sup> /s)	Case 4 (m <sup>3</sup> /s)	Case 5 (m <sup>3</sup> /s)	Difference (m <sup>3</sup> /s)	Rate of difference (%)
20	20.25 <sup>†</sup>	20.37	20.42	20.49	20.56*	0.304	1.5
40	14.68 <sup>†</sup>	14.82	14.95	15.06	15.15*	0.471	3.1
60	10.12	10.11 <sup>†</sup>	10.19	10.31	10.37*	0.261	2.5
80	6.60*	6.42	6.36 <sup>†</sup>	6.37	6.42	0.236	3.6
100	3.80*	3.52	3.42	3.36	3.32 <sup>†</sup>	0.478	12.6

\*Maximal damage over cases with each initial storage; <sup>†</sup>minimal damage over cases with each initial storage.

### 3. 適用と考察

#### 3.1 対象流域とシミュレーション条件

提案手法を吉野川流域の早明浦ダムに適用し、利用性分析を行った。早明浦ダムは利水、治水、発電など、多目的ダムとして運用されているが、本研究では利水操作のみを対象としているため、全ての貯水容量のうち、利水容量のみを対象とした。また、操作時には、洪水時には所定の治水操作を行いつつ、その他の場合には利水目的である渇水被害を最小にすることを目的として放流操作を行い、発電のための操作は考慮しないものとした。また、流況評価地点については、実際には早明浦ダム下流に位置する池田ダムの直上流に定められているが、確率予測情報の性状が利水操作結果へ及ぼす影響の分析を容易にするため、本研究では早明浦ダムの直下流に位置すると仮定した。そのため、流況評価地点における河川流量は早明浦ダム放流量と一致し、流

量の模擬発生は早明浦ダムへの流入量についてのみ行うことにした。これらの仮定により、前章の議論における流況評価地点の河川流量 $w_t$ と需要量 $d_t$ は、それぞれダム放流量 $r_t$ と目標放流量 $R_t$ に読み替えられる。

一方、 $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$ ,  $S_{\min}$ ,  $S_{\max}$ は早明浦ダムの諸元よりそれぞれ、0 (m<sup>3</sup>/s), 400 (m<sup>3</sup>/s), 0 (m<sup>3</sup>), 173,000,000 (m<sup>3</sup>)と定めた。予測および操作の時間解像度(1期の長さ)は5日を考え、シミュレーション期間、予測リードタイム、最適化計算期間は、それぞれ73期(約1年間に相当)、18期(約3ヶ月間に相当)、18期と設定した。最適化計算期間の最後の期における将来被害関数( $f_{18}$ )については、向こう1年間(73期)の渇水被害を考慮し、次式によって計算した。

$$f_t(s_{73}) = \min_{R_{\min} \leq r_{73} \leq R_{\max}} H_t(w_{73})$$

$$f_t(s_t) = \min_{R_{\min} \leq r_t \leq R_{\max}} \{H_t(w_t) + f_{t+1}(s_{t+1})\} \quad (t=19, \dots, 73) \quad (10)$$

この予報期間以降（19期目以降）の将来被害の算出にあたっては、最適計算時に将来の流況をやや慎重に考えることを促すため、1993年～2007年までの流況データを基に算出した1/3低流況を用いた。また、流況評価地点を早明浦ダム直下流に位置すると仮定したことに伴い、流況評価地点における確保流量を、早明浦ダム下流域の水文特性から池田ダム地点における利水安全度が概ね1/5程度になるように、本来の流況評価地点である池田ダム直上流地点の確保流量から残流域流出量を差し引くことによって逆算して設定した（野原・堀，2013）。

流入量の真値としては、吉野川流域で実際に渇水のあった、1994年、2005年、2008年の流況を用い、特に渇水の被害が生じた夏期（第37期～第54期、概ね7月上旬～9月下旬の3カ月間）についてシミュレーションを実施した。確率予測情報の模擬発生時のパラメータ $C_c^2$ と $C_p^2$ は、リードタイムに対して定常であると仮定し、 $C_c^2+C_p^2 \leq 1$ を満たす15の組合せ（シナリオ）について検討を行った。流入量の確率予測情報を考慮した利水操作シミュレーションは、予測情報の不確実性に関する上記の各シナリオについて、それぞれ5種類の初期貯水量（利水容量の20%、40%、60%、80%、100%）を想定して、それぞれ1,000通り実施した。また、確率DPの適用のための状態量の離散化数は放流量、貯水量ともに100レベルとした。

このうち、本稿では、 $C_c^2+C_p^2=0.4$ である5通りのシナリオ、すなわち、 $C_c^2=0.4$ かつ $C_p^2=0.0$ （Case 1）、 $C_c^2=0.3$ かつ $C_p^2=0.1$ （Case 2）、 $C_c^2=0.2$ かつ $C_p^2=0.2$ （Case 3）、 $C_c^2=0.1$ かつ $C_p^2=0.3$ （Case 4）、 $C_c^2=0.0$ かつ $C_p^2=0.4$ （Case 5）についての分析結果を中心に示す。

### 3.2 シミュレーション結果と利用性分析

予測情報の不確実性に関する各ケースおよび各初期貯水量について、確率予測情報を考慮した利水操作シミュレーションの期間全体の平均渇水被害をTable 1～3に示す。なお、1994年、2005年、2008年の流況に対してシミュレーションを行った結果をそれぞれTable 1, Table 2, Table 3に掲載している。典型的な低流況であった1994年と2005年に対するシミュレーション結果では、初期貯水量が比較的小さい場合（20%～60%）、 $C_c$ が大きく、また $C_p$ が小さくなるほど、より大きな渇水被害が生じているのが分かる。反対に、これらの流況に対する結果において、初期貯水量が比較的大きい場合（80%、100%）においては、確率予測情報の $C_c$ が小さく、また $C_p$ が大きくなるほど、渇水被害が大きくなっていることが確認できる。一方、著しく低い流況であった2008年に対する結果では、上記とは反対の結果が見られた。すなわち、初期貯水量が比較的小さい場合（20%、40%、60%）に

おいては、 $C_c$ が小さくかつ $C_p$ が大きくなるにつれて渇水被害が大きくなるのに対し、初期貯水量が比較的大きい場合（80%、100%）においては、 $C_c$ が大きくなると $C_p$ が小さくなるにつれて、より大きな渇水被害が生じていた。

Case 1 ( $C_c=0.4, C_p=0.0$ ) とCase 5 ( $C_c=0.0, C_p=0.4$ ) の操作シミュレーション結果の時系列をFig.3とFig.4に示す。Fig.3には初期貯水量を80%として1994年の低流況を対象に確率流量予測情報を用いた利水操作シミュレーションを実施した際の結果を、Fig.4には同様に初期貯水量を20%として2008年の低流況を対象にシミュレーションを実施した際の結果を示している。Fig.3から、より大きな $C_p$ が割り当てられたCase 5においては、低流況が続く貯水量が低下するよりも先に節水を行うことによってCase 1より大きな渇水被害が生じていることが分かる。一方、Fig.4では、Case 5は、第43期より前ではCase 1と比較して渇水被害が小さいのに対し、第44期から第47期にかけては貯水量の低下に伴って大きな渇水被害が生じている。

2008年の流況が著しく低かったことを考えると、 $C_c^2+C_p^2$ の値が同じである確率流入量予測情報を利用したダム貯水池の渇水操作を比較した場合、上記の結果より以下のように考察することができる。1994年や2005年における大きな初期貯水量（80%、100%）の場合のように、それほど厳しくない渇水の状況下では、より $C_p$ の小さな、すなわち、より曖昧性の小さな確率流入量予測情報を考慮することが、ダム貯水池のより効果的な渇水管理にとって重要であると考えられる。これは、渇水時貯水池操作においてより不明瞭な（より曖昧な）確率予測情報を考慮した場合には、予測確率分布の裾野が比較的に広いことから、生起確率は低いものの生起した場合に大きな渇水被害をもたらすことが懸念される極端に低い流況も予測の中に含まれてしまい、これを考慮した保守的な操作を行うことによって、不必要な節水を行ってしまうからであろう。1994年、2005年流況での小さな初期貯水量（20%、40%、60%）でのシミュレーションや、2008年の流況での大きな初期貯水量（80%、100%）の条件下でのシミュレーションで見られたように、中程度の規模の渇水時には、 $C_c$ がより小さい、すなわち、より安定性の高い確率流入量予測情報を考慮した方が、ダム貯水池の利水操作をより効果的にすることを期待できると考えられる。これは、より安定性が高く予測幅の広い確率予測情報を考慮することによって、将来の低流況の可能性を適切に予測し、それに応じた節水を段階的に比較的緩やかに実施することができたからであると考えられる。一方、2008年の流況を使って比較的小さい初期貯水量（20%、40%、60%）の条件下で行ったシミュレーション

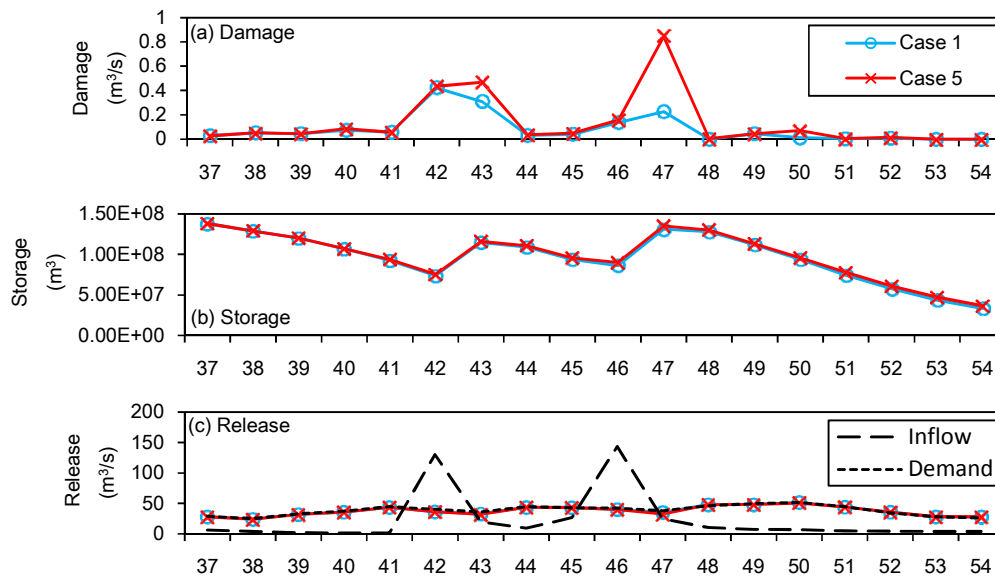


Fig.3 Simulated time series of (a) damage, (b) storage and (c) release with initial storage of 80% for 1994

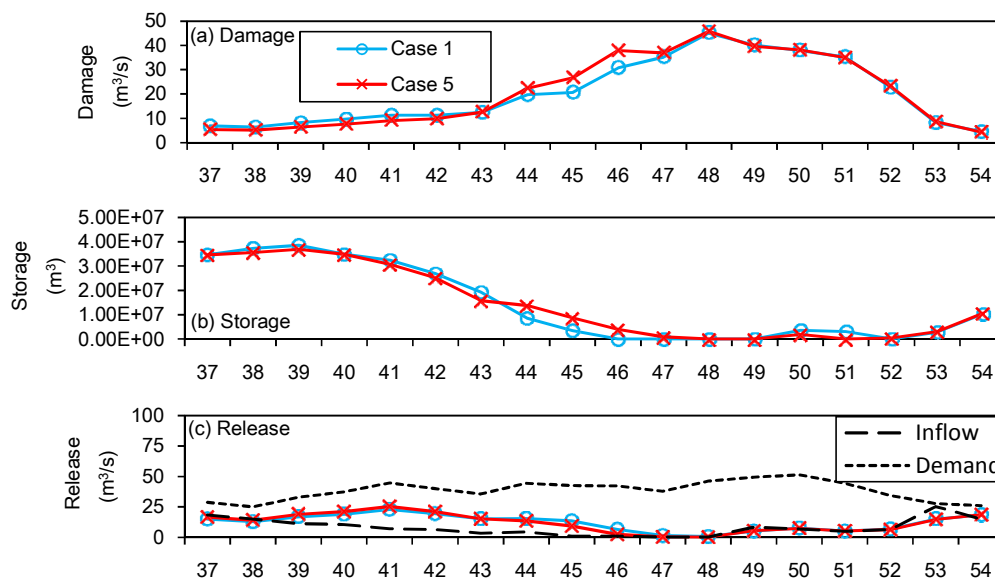


Fig.4 Simulated time series of (a) damage, (b) storage and (c) release with initial storage of 20% for 2008

シミュレーション結果に示されたように、著しい渇水時における利水操作では、 $C_p$ の小さな確率流入量予測情報が再び好まれるようである。これは、真の流況系列がそもそも著しく低いので、 $C_c$ が少々大きくなって予測が不安定になって分布の平均の誤差が大きくなっても、概ね低流況の予測となるので節水の意思決定に大きな影響を及ぼさなかったものと考えられる。逆に、 $C_p$ が大きくなると豊水の予測も小さな予測確率ながら含まれることになり、これに引きずられて節水が緩和されることによって、後に貯水量が著しく低下し大規模な水不足が生じたことが、上記の結果をもたらした可能性が考えられる。

#### 4. おわりに

本稿では、渇水時の貯水池利水操作における様々な不確実性を持った確率流入量予測情報の利用性の分析を行った。確率予測情報の不確実性として不安定性と不明瞭性を考え、様々な不安定性や不明瞭性を持った確率流入量予測情報を模擬発生した上で、吉野川流域早明浦ダムを対象として、渇水時の利水放流決定における確率流入量予測情報の利用性の基礎的な分析を行った。その結果、比較的小規模な渇水時については、 $C_p$ がより小さいこと、すなわち予測情報の曖昧性が小さいことがより重要であったのに対し、中規模の渇水時においては、より小さな $C_c$ 、

すなわちより安定した確率予測情報が好まれるという結果となった。一方、大規模な渇水時には、多少不安定となってもより明瞭な確率予測情報を考慮することが、ダムによるより効果的な渇水調節をもたらすことが示唆された。本稿では、仮想化した流域設定を用いて、過去の低流況事例についてのシミュレーション分析を行ったが、今後はより現実に近い設定を用いながら、様々な流況の下でのシミュレーション分析を行い、より一般的な知見を得ることが求められる。さらに、最適計算結果が確率DPの離散化レベル数や被害関数の設定によっても変化することが想定されるので、これらの点からも、今後より網羅的な分析が必要であると考えられる。

## 謝 辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会の科学研究費補助金（課題番号：23760462）の支援を受けた課題研究の一環として行われた。また、吉野川流域および早明浦ダムに関する諸データについては、独立行政法人水資源機構より提供を受けた。これらの関係諸氏に対し、ここに深い謝意を表す。

## 参考文献

- 池淵周一・小尻利治・宮川裕史（1990）：中・長期気象予報を利用したダム貯水池の長期実時間操作に関する研究，京都大学防災研究所年報，第33号B-2，pp.167-192.
- 野原大督・堀智晴（2013）：予測情報の不確実性を考慮した貯水池利水操作における確率流況予測情報の利用性分析手法の開発，京都大学防災研究所年報，第56号B（投稿中）。
- Faber, B. A. and Stedinger, J. (2001): Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts, *Journal of Hydrology*, 249, pp.113-133.
- Georgakakos, K.P. and Graham, N.E. (2008): Potential benefits of seasonal inflow prediction uncertainty for reservoir release decisions, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol.47, pp.1297-1321.
- Gong, G., Wang, L., Condon, L., Shearman, A. and Lall, U. (2010): A simple framework for incorporating seasonal streamflow forecasts into existing water resource management practices, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol.46, pp.574-585.
- Karamouz, M. & Vasiliadis, H.V. (1992): Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecasts, *Water Resour. Res.* Vol.28, pp.1221-1232.
- Kelman, J., Stedinger, J.R., Cooper, L.A. and Yuan, S.-Q. (1990): Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation, *Water Resour. Res.*, Vol.26, pp.447-454.
- Kim, Y. O., Eum, H. I., Lee, E. G. and Ko, I. H. (2007): Optimizing Operational Policies of a Korean Multireservoir System Using Sampling Stochastic Dynamic Programming with Ensemble Streamflow Prediction, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(1), pp.4-14.
- Krzysztofowicz, R. (2001): The case for probabilistic forecasting in hydrology, *Journal of Hydrology*, Vol.249, pp.2-9.
- Pianosi, F. and Ravazzani, G. (2010): Assessing rainfall-runoff models for the management of Lake Verbano, *Hydrol. Process.* Vol.24, pp.3195-3205.
- Nohara, D. and Hori, T. (2012): Impact analysis of reliability and discriminability index of stochastic inflow prediction and its application to long-term reservoir operation, *Proc. of HIC2012*, Hamburg, Germany.
- Zhao, T., Cai, X. and Yang, D. (2011): Effect of streamflow forecast uncertainty on real-time reservoir operation, *Advances in Water Resources*, Vol.34, pp.495-504.

（論文受理日：2013年6月11日）