

長期貯水池操作へのアンサンブル降水予報導入時における 最適化モデルの放流決定過程に関する一考察

野原大督・坪井亜美*・堀 智晴

* 東京大学大学院工学系研究科

要 旨

長期貯水池操作へのアンサンブル予報の効果的な適用手法の構築に資するため、利水操作を対象にアンサンブル予報を用いた3種の最適放流決定モデルを構築し、予報の利用方法や各モデルにおける放流決定過程の違いが操作に与える影響について分析を行った。最適放流決定モデルには、いずれもDPの一種である決定論的DP、確率DP、及びSampling Stochastic DPを用いた。気象庁の1か月アンサンブル予報の降水量予報GPVを用いて吉野川流域早明浦ダムを対象に分析を行った結果、予測精度が比較的悪い場合でも予報を考慮することが有用であること、予報の分布情報を放流決定時に考慮する場合は分布の平均値だけでなく中央値にも注意する必要があることが示唆された。

キーワード：長期貯水池操作、アンサンブル予報、DP、最適放流決定

1. はじめに

ダム貯水池の計画的・効率的な運用を行うためには、将来の流域における流況を推定し、ダム操作に反映させることは重要である。近年、わが国の河川管理においては、洪水対策を目的とする高水管理において、洪水時の管理体制への移行や計画規模を超える可能性があるか等の判断に降水予測や台風進路予測を行っているところもある（吉谷，2007）。また、和田ら（2005）は、気象庁の予測降雨情報の適用性の検討を行っており、高水管理への利用性を示している。一方、渇水対策を対象とした低水管理に対しては、気象庁が発表している中・長期気象予報を定量的に利用した数カ月先までの長期降水量の予測手法について研究されているが（新井・丸山，1979；池淵ら，1990；Kojiri et al., 1994），予測のリードタイムが数週間～数ヶ月間という長い期間であるため予測精度の低下が避けられず、じつようか実管理での利用には至っていない。このため、貯水池の管理者は、具体的にどの時点で渇水を引き起こすような少雨が想定されるのか、あるいは既に渇水が生じている場合いつ渇水状態を解消するような降水があるのかについて情報が無いまま、主に過去の統計的な情報と現在の観測情報をもとに放流量の決定

を行わざるを得ないのが実情である。

こうした予測精度の低下を抑える方法として、複数の数値予報の集合を統計的に処理し、単独の数値予報より確からしい予報を得ようとする手法（経田，2006）であるアンサンブル予報が、現業の気象予報業務に取り入れられている。我が国でも、1996年3月に1か月予報に導入されたことを皮切りに、現業予報業務におけるアンサンブル予報技術の利用が進んでいる。また、1か月予報に関しては、2001年よりアンサンブル予報における個々の予報値（アンサンブルメンバという）が提供されている（古川・酒井，2004）。これらのメンバ別の予報を考慮することによって、最終的な予報値のみならず、想定される複数の状況とそれらの状況が発生する可能性、あるいは予測の信頼性に関する情報が得られることが期待されることから、アンサンブル予報の利用は、特に、参照とすべき予測情報の精度が低くなる長期の貯水池管理において有用であると考えられる。

このような観点から、これまでにも、アンサンブル予報を利用した長期貯水池管理における最適放流決定手法に関する研究が行われてきている。Faber and Stedinger (2001) は、米国の National Weather Service が融雪期を対象に週ごとに発表しているアンサンブル流況予測情報（NWS-ESP）を利用し、予

測情報と統計情報を考慮した貯水池の最適放流決定手法を提案している。また、Kim et al. (2007) は、韓国のGeum River 流域の2つの多目的ダムを対象に、予測対象月の過去20年間の降水時系列を入力として降雨流出モデルによって作成したアンサンブル流況予測を考慮した、貯水池の最適放流決定手法を提案している。いずれの研究においても、貯水池操作の最適化手法には決定論的DP (DDP)、確率DP (Stochastic DP, SDP)、または確率DPの一種であるSampling Stochastic DP (SSDP) といったDPモデルを採用しており、操作結果の比較を行った上で、貯水池操作の最適化計算におけるアンサンブル予報利用時のSSDPの有利性を示している。しかし、これらの比較においては、操作の結果からそれぞれのDPモデルの優劣を議論しているのみであり、具体的にどのような決定過程が操作結果の差異をもたらしたかについては、詳しく議論されていない。今後、貯水池管理へのアンサンブル予報の導入を進める上で、最適化手法として用いられるDPモデルの操作決定過程の違いを分析することは、予報モデルや対象とする流域によって性質が異なると考えられるアンサンブル予報と組み合わせて実際にどのような最適化計算モデルを採用すれば良いかを判断するために、非常に重要であると考えられる。

そこで本稿では、こうした分析の最初のステップとして、アンサンブル降水予報を考慮するために前述の3つのDPモデル (DDP, SDP及びSSDP) を最適化計算に用いた長期貯水池操作の実時間最適化モデルを構築し、3つの最適化モデル間の最適放流決定過程の違いについて分析を行う。アンサンブル降水予報には、気象庁が提供する中長期気象予報メニューのうち、データの入手性を考慮し、1か月アンサンブル予報の日別積算降水量予報値を利用する。また、簡便のため、長期貯水池操作として利水操作のみを対象とし、将来1か月間の予報値としてアンサンブル平均値を考慮したDDPモデル、アンサンブルメンバー別の降水量時系列を考慮したSDPモデル及びSSDPモデルを用いて放流決定の最適化を行い、計算過程の差異を分析する。

2. アンサンブル降水予報を用いた将来流況時系列群の推定

気象庁が提供する中長期気象予報メニューには、1週間予報、1か月予報、3か月予報、暖・寒候期予報があり、それぞれ2001年3月、1996年3月、2003年3月、2003年9月からアンサンブル予報が現業予報業務に導入されている。本研究では、これらの予報メニューのうち、データの入手性が高く、かつデータ蓄

積期間が最も長い1か月予報を利用する。

1か月予報では、複数の高度面における気圧、風速、気温、相対湿度や地表面における積算降水量について、それぞれ50個の日別予報時系列が2.5°格子のGPVの形式で34日先まで提供される。予報は週に1度更新されることから、実時間での貯水池操作の最適化への適用性が高い。本研究では、これらの予報要素のうち、貯水池管理に直接的に影響を及ぼすと考えられる積算降水量の予報値 (50系列) を用い、最適化計算に利用することを目的に、以下のような手順で対象とする流域における50の将来流況系列に変換する。

まず、対象とする河川流域周辺に存在する格子点の予報値について、積算降水量として与えられる予報時系列を全て日別降水量に変換する。次に、上記の変換によって各格子点について得られた34日先までの日降水量時系列 (各格子点に対し50系列) から、対象とする河川流域の流域平均日降水量系列 (50系列) を、あらかじめ構築した統計回帰式を用いて算出する。最後に、得られた流域平均日降水量時系列からダム地点及び流況評価地点における34日先までの日別流況時系列 (各50系列) を、それぞれ統計回帰式を用いて算出する。そして、ダム地点及び流況評価地点における各50個の流況時系列を用いて、34日先までの予測状況を考慮した貯水池操作の最適化計算を行う。

3. 長期貯水池操作の最適化のためのDPモデル

3.1 長期貯水池操作の最適化のためのDPモデルの概要

貯水池操作では、放流量は、ダム貯水池が存在する流域の現在から将来にわたる水文状況を考慮しながら逐次的に求められる。この逐次的な性質から、貯水池の放流決定問題は、DPを用いた最適化問題として定義しやすい。貯水池操作の最適化を目的としたDPモデルは数多くあるが (Yeh, 1985; Labadie, 2004 に詳しい)、本研究では特に利水操作に着目し、長期貯水池操作の最適化問題を次のように定義する。

利水操作を対象とすると、最適化の目的は渇水 (水不足) による被害の最小化であると考えることができる。いま、 T 期先までの予測流況を考慮して操作の最適を行うことを考えると、この最適化問題の目的関数は、次のように定義できる。

$$\min_r \sum_{t=1}^T H_t \quad (1)$$

ここに、 r_t は第 t 期 ($t=0, \dots, T$) の放流量、 H_t は第 t 期において被る被害を表す被害関数である。いま、流況評価地点がダム下流の河道における1地点である場合を考えると、渇水による被害を表す被害関数は、池淵ら (1990, 前出) と同様に、不足量と不足率の積として以下のように定義できる。

$$H_t = \begin{cases} \frac{(d_t - q_t)^2}{d_t} & (q_t < d_t) \\ 0 & (q_t \geq d_t) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 d_t は評価地点における第 t 期の需要量、 q_t は評価地点における第 t 期の流量である。渇水の被害関数には、Kim et al. (2007, 前出) で用いられているように、不足水量の2乗として定義されることもある。いずれにしても、不足水量が増大するほど被害がそれ以上の割合で増大するという感覚を反映して、被害関数には不足水量の高次関数の形式のものが用いられることが多い。

一方、ダム貯水池の物理的な制約やダム下流の河道の流況安定化のために必要な制約から、貯水量や放流量には最大値、最小値が存在し、これが最適化問題の制約条件となる。

$$S_{\min} \leq s_t \leq S_{\max} \quad (3)$$

$$R_{\min} \leq r_t \leq R_{\max} \quad (4)$$

ここに、 s_t は第 t 期期首における貯水量である。本研究では、利水操作を対象としているので、 $S_{\min}$ は利水容量が0である場合の貯水量であり、 $S_{\max}$ は利水容量が最大の場合の貯水量を表している。また、通常、 $R_{\min}$ は0、 $R_{\max}$ は操作規則等によって定められている最大放流量である。

また、貯水量の変化は、連続式を用いて次のように表わされる。

$$s_{t+1} = s_t + i_t - r_t - \alpha_t \quad (5)$$

ここで、 i_t は第 t 期におけるダム貯水池への流入量、 α_t は第 t 期における蒸発や漏水による貯水量の減少量である。ただし本研究では、蒸発や漏水による貯水量の損失は無いものと考え、以降では $\alpha_t = 0$ とする。一方、関数方程式は、以下のように定義できる。

$$\begin{aligned} f_T(s_T) &= \min_{r_T} H_T(q_T) \\ f_t(s_t) &= \min_{r_t} \{H_t(q_t) + f_{t+1}(s_{t+1})\} \quad (t=1, \dots, T-1) \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 $f_t(s_t)$ は将来被害関数であり、第 t 期期首において貯水量が s_t である場合に、第 t 期から第 T 期までの間に被りうる総被害の最小値を表す。(1)式で表わされる目的関数を持つ最適化問題は、既出の制約条件のもとで、将来被害関数 $f_t(s_t)$ を第 T 期から第1期へと後退しながら順に求めることで解くことができる。全ての期間に対する将来被害関数 $f_t(s_t)$ が算出された後、初期貯水量 s_1 と(5)式を用いながら、以下の式を $t=1$ から逐次的に用いることによって、最適放流量 r_t が一意に決定される。

$$r_t^* = \min_{r_t} \{H_t(q_t) + f_{t+1}(s_{t+1})\} \quad (t=1, \dots, T-1) \quad (7)$$

以上で述べたDPモデルは、決定論的DP (DDP) と呼ばれるモデルであり、DPモデルの中で最も基本的なものである。本研究では、アンサンブル平均予報値 (1回の予報につき1系列) を用いた最適化放流決定に、このモデルを用いる。

3.2 アンサンブル流況予測を用いた貯水池操作最適化のための確率DPモデル

将来の流域の状態に関する情報としてアンサンブル流況予測を用いる場合、将来の流域の状態を確定的に扱うことができない。このように、将来の状態を決定論的に一つの状態と考えない場合、不確実性を組み込むために確率DP (SDP) が導入される。確率DPでは、将来の各期における流況を確率分布を持ったものとして表現し、目的関数(本研究の場合、渇水による被害)をその期待値で表現する。確率DPの関数方程式は、一般に以下のように記述される (Faber and Stedinger, 2001, 前出)。

$$\begin{aligned} f_t(s_t) &= \min_{R_{\min} \leq r_t \leq R_{\max}} \mathbb{E}_{i_t} \left\{ H_t(q_t) + \mathbb{E}_{i_t} [f_{t+1}(s_{t+1})] \right\} \\ (s_{t+1} &= s_t + i_t - r_t) \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、

$$\begin{aligned} R_{\min}^* &= \max \{R_{\min}, s_t + i_t - S_{\max}\} \\ R_{\max}^* &= \min \{R_{\max}, s_t + i_t - S_{\min}\} \end{aligned} \quad (9)$$

第 t 期における貯水池への流入量が i_t となる確率を $P[i_t]$ 、ダムから評価地点までの流出量が α_t となる確率を $P[\alpha_t]$ とすると、目的関数及び関数方程式はそれぞれ以下ようになる。

$$\min_{R_{\min}^* \leq r_t \leq R_{\max}^*} \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{o_t} P[o_t] \cdot H_t(q_t) \right\} \quad (10)$$

$$f_t(s_t) = \min_{R_{\min}^* \leq r_t \leq R_{\max}^*} \sum_{o_t} P[o_t] \cdot \left\{ H_t(q_t) + \sum_{i_t} P[i_t] \cdot f_{t+1}(s_{t+1}) \right\} \quad (11)$$

$$(q_t = o_t + r_t)$$

さらに、連続する期の流量の持続性や時系列性を考慮するためには、マルコフ連鎖を用いた確率 DP が用いられる (Loucks et al., 1981)。この場合、貯水量だけでなく流入量も状態変数として考え、第 t 期において流入量が i_t であり、第 $t+1$ 期に流入量が i_{t+1} である遷移確率 $P[i_{t+1}|i_t]$ と、同様にして定義される流出量に関する遷移確率 $P[o_{t+1}|o_t]$ を用いて、関数方程式は次のように記述される。

$$f_t(s_t, i_t) = \min_{R_{\min}^* \leq r_t \leq R_{\max}^*} \sum_{o_t} P[o_{t+1}|o_t] \cdot \left\{ H_t(q_t) + \sum_{i_t} P[i_{t+1}|i_t] \cdot f_{t+1}(s_{t+1}, i_{t+1}) \right\} \quad (12)$$

ただし、本研究では、それぞれ 50 の日ごとの流量・流出量予測値が 34 日先まで与えられることから、この期間における最適化計算ではこれをそのまま用いることにし、遷移確率を考慮しないものとする。また、50 の流量・流出量予測値はそれぞれアンサンブル降水予報メンバから独立に求められており、これらの期待される出現確率はすべて均一であると考えることが自然であることから、予測系列数 (アンサンブル予報のメンバ数) を M ($=50$) とすると、式 (10), (11) における $P[i_t]$, $P[o_t]$ は、予測系列 m における第 t 期の流量・流出予測値 i_t^m , o_t^m を使って以下のように定義できる。

$$P_t[i_t^m] = P_t[o_t^m] = \frac{1}{M} \quad (t=1, \dots, T) \quad (13)$$

よって、式 (10), (11) は式 (13) の関係を用いて以下のように定義できる。

$$\min_{R_{\min}^* \leq r_t \leq R_{\max}^*} \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M H_t(q_t^m) \right) \quad (14)$$

$$f_t(s_t) = \min_{R_{\min}^* \leq r_t \leq R_{\max}^*} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left\{ H_t(q_t^m) + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M f_{t+1}(s_{t+1}^m) \right\} \quad (15)$$

$$(q_t^m = r_t + o_t^m, \quad s_{t+1}^m = s_t + i_t^m - r_t)$$

式 (15) の関数方程式に従って、第 T 期から第 1 期までの将来被害関数 $f_t(s_t)$ を算出し、最後に現在の貯水量 s_t を与えれば、以下の式から最適放流量 r_t^* が

得られる。

$$r_t^* = \min_{R_{\min}^* \leq r_t \leq R_{\max}^*} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \{ H_t(q_t^m) + f_{t+1}(s_{t+1}^m) \} \quad (16)$$

3.3 アンサンブル流況予測を用いた貯水池操作最適化のための SSDP モデル

確率 DP では、複数の将来流況系列の確率的な性質は考慮されるが、各計算時間断面において次の時間断面における状態が確率分布として捉えられるため、各流況の時系列的な特徴が最適化計算に反映されにくい。そこで、流況の持続性を表現するために、状態変数に関する遷移確率を用いる代わりに複数の流況時系列を用いる Sampling Stochastic DP (SSDP) が考案されている (例えば、Kelman et al., 1990)。

SSDP による貯水池操作の最適化計算では、まず各予測流況系列が実際発生した場合に見込まれる将来被害がそれぞれ算定され、続いてその将来被害の期待値を用いて放流の最適化計算が行われる。具体的には、まず各流況予測時系列を個別の決定論的予測と見なし、それぞれに対して決定論的 DP を適用しながら以下の式に従って将来被害関数を求める。

$$f_t(s_t, m) = \min_{R_{\min}^* \leq r_t \leq R_{\max}^*} \{ H_t(q_t^m) + f_{t+1}(s_{t+1}^m, m) \} \quad (17)$$

$$(q_t^m = r_t + o_t^m, \quad s_{t+1}^m = s_t + i_t^m - r_t)$$

ここで、 $f_t(s_t, m)$ は第 t 期期首の貯水量が s_t のときに、予測流況時系列 m ($m=1, \dots, M$) に対して計算された第 t 期以降に受ける渇水被害の総和、 M は予測流況系列の総数 (本研究は $M=50$) である。次に、対象期以降にこれらの時系列が実現する確率をもとに、被害の期待値を求める。つまり、対象期の期首貯水量 s_t に対し、各予測流況時系列について当期の被害とそれ以降に被り得る被害の最小値の和を算出し、その値の予測時系列間の期待値を最小とするような放流量を最適放流量とする。

$$\min_{R_{\min}^* \leq r_t \leq R_{\max}^*} E \{ H_t(q_t^m) + f_{t+1}(s_{t+1}^m, m) \} \quad (18)$$

ただし、本研究では、全ての予測流況時系列が実現する確率を一律 (すなわち全て $1/M$) と考えるので、式 (18) をさらに次式のように変換することができる。

$$\min_{R_{\min}^* \leq r_t \leq R_{\max}^*} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \{ H_t(q_t^m) + f_{t+1}(s_{t+1}^m, m) \} \quad (19)$$

Table 1 Specs of applied reservoir

Capacities		Specs
Active storage capacity		289,000,000 m ³
Water use capacity		173,000,000 m ³
Flood control capacity	Flood season (July 1 st – Oct. 10 th)	90,000,000 m ³
	Dry season (Oct. 11 th –June 30 th)	80,000,000 m ³
Power generation capacity	Flood season (July 1 st – Oct. 10 th)	26,000,000 m ³
	Dry season (Oct. 11 th –June 30 th)	36,000,000 m ³
Designed flood inflow		4,700 m ³ /sec
Designed release discharge		2,000 m ³ /sec
Maximum of release discharge in case of no flood situation		800 m ³ /sec

一方、目的関数については、確率 DP と同様に式(14)を用いる。

4. 適用と考察

4.1 対象流域

前章で構築した長期貯水池操作のための最適化DDP, SDP, SSDPモデルを、吉野川流域の早明浦ダムに適用した。アンサンブル予報には気象庁の1か月アンサンブル降水予報を用い、主に利水操作を対象として、2007年1月から2008年12月までの期間で適用を行った。

早明浦ダムは、吉野川水系における水資源開発の中核をなすもので、洪水調節、各種既得用水の安定取水を図るとともに、新規用水開発による四国四県への供給および発電を行っている（水資源機構、2004）。早明浦ダム流域は流域降水量が周辺より多いことから、計画された供給量も多いが、降水の年々変動率や日単位の集中度が大きく、少雨時には貯水量が急激に減少し、そのため渇水が頻発している（藤部ら、2008）。このような水資源供給量の変動が大きな流域においては、統計的な知見が必ずしも将来の状態を良く表現しないことから、予測情報の利用は有意であると考えられる。

早明浦ダムの諸元をTable 1 に示す。前述のように、早明浦ダムは利水、治水、発電など、多目的ダムとして操作されているが、本研究では適用を行う3つのDPモデルによる操作結果の比較を容易にするため、これらの操作のうち利水操作のみに着目する。すなわち、洪水時には操作規則に定められた操作を行いながら、原則としてダム下流の評価地点における水

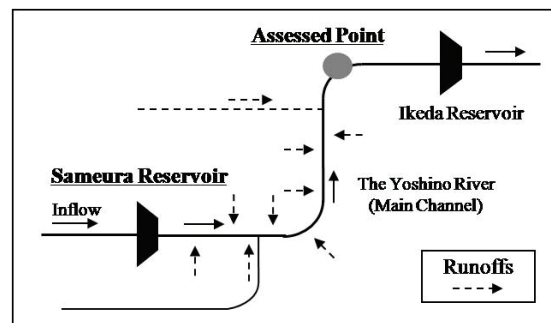


Fig. 1 Simplified model of the downstream of Sameura reservoir for application

不足量（渇水被害）を最小化することを目的として操作を行い、発電による便益は評価しないものとした。

また、早明浦ダムとその下流域のモデルとしては、DPを適用するために、利水操作を中心に行うことを念頭に置きながら、Fig. 1 に示すような単純化したモデルを考えた。流況の評価地点は、Fig. 1 に示すように、早明浦ダムの下流にある池田ダムの直上流に位置する。ここで、状態量として考えるものは、早明浦ダムの流入量及び貯水量、早明浦ダム直下流から評価地点までに吉野川本川へ流入してくる水量（便宜上、以下では残流域流出量と呼ぶ）、評価地点における河川流量の4つであり、決定量は早明浦ダムからの放流量である。早明浦ダムから評価地点までの区間には、比較的大きな支川からの流入もあるが、これらも含めた全ての支川流入の合計分の流入を残流域流出量として表現した。さらに、この区間には最も大きな支川である銅山川からの流入もあるが、非洪水時には多くとも0.45 m³/sec 程度で

あるため、残流域流出量に含めて考えた。

予報情報として用いるのは、対象流域を囲む4つの予報格子点 (35° N, 132.5° E), (35° N, 135° E), (32.5° N, 132.5° E), (32.5° N, 135° E) 上における、1か月アンサンブル予報の降水量GPVである。

本適用計算では利水操作のみを対象としているため、最適化計算の対象となる貯水量には利水容量のみを考えた。最適化問題の制約条件は、Table 1 に示した貯水池諸元の物理的あるいは規則上の制約を用いて、以下のように記述される。

$$0(\text{m}^3) \leq s_t \leq 173 \times 10^6 (\text{m}^3) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} 0 \leq r_t &\leq 2000 (\text{m}^3/\text{sec}) && (\text{for flood situation}) \\ 0 \leq r_t &\leq 800 (\text{m}^3/\text{sec}) && (\text{for no flood situation}) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、洪水時とは、早明浦ダムへの流入量が800 m³/sec 以上である状態を指し、非洪水時とは流入量が800 m³/sec 未満である状態を指す。

一方、予報期間の最終期（本研究では34日目）における将来被害関数（すなわち、ここでは f_{34} ）は、実際に最適化計算を行う前に与えておく必要がある。本適用では、この f_{34} を、将来1年間にわたっての渇水被害を考慮しながら次式に従って算出することにした。

$$\begin{aligned} f_{365}(s_{365}) &= \min_{r_{365}} H_{365}(q_{365}) \\ f_t(s_t) &= \min_{r_t} \{H_t(q_t) + f_{t+1}(s_{t+1})\} \quad (t = 34, \dots, 364) \end{aligned} \quad (22)$$

この予報期間以降（35日目以降）の将来被害の算出にあたっては、当該期間に対する予測情報を利用せずに、平年流況を用いた。

4.2 アンサンブル流況予測系列の推定結果

以下に適用結果を示す。初めに、前述の4格子点における予報値から流域平均降水量を推定する線形重回帰式を作成した結果、以下の回帰式が得られた。

$$p_t = 10.00 - 0.523 \cdot p_t^1 + 1.188 \cdot p_t^2 + 1.981 \cdot p_t^3 - 2.731 \cdot p_t^4 \quad (23)$$

ここで、 p_t^i は第 t 期に対する第 i 格子の予報GPVであり、 i は左上の格子点から時計回りに1から4までの番号を割り当てている。しかし、統計的に十分な期間分の予報データを用意できなかったことから、式 (23) の重決定係数は小さく、検証期間における予測精度は、4地点のGPVの単純平均を用いたものと比

較して同等かあるいは悪かった。このため、流域平均降水量の推定方法としては、式 (23) の回帰式を用いずに、4格子点における予報GPVの単純平均値を用いることにした。

次に、流域平均降水量から早明浦ダムへの流入量を推定する線形重回帰式を作成した。回帰式の推定には、1979年1月から2005年12月までの27年間の日観測値を用いた。3日前までの流入量と降水量の組み合わせを説明変数に用いた重回帰式のうち、定数項をゼロとし、AICが最小となる説明変数の組み合わせと係数を求めた結果、以下のような回帰式が得られた。

$$\begin{aligned} i(t) &= a_1 \cdot p(t) + a_2 \cdot p(t-1) + a_3 \cdot i(t-1) + a_4 \cdot i(t-2) + a_5 \cdot i(t-3) \\ &\begin{cases} a_1 = 0.41476 & a_2 = 0.16677 \\ a_3 = 0.11503 & a_4 = 0.05309 & a_5 = 0.02702 \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

ここに、 $i(t)$ は第 t 期における早明浦ダムへの流入量、 $p(t)$ は第 t 期における流域平均降水量である。重決定係数は0.810で推定精度は非常に良いと言える。また、それぞれの偏回帰係数について、帰無仮説: $a_i=0$ ($i=1, \dots, 5$) で検定したところ、いずれも p 値は 10^{-6} 未満であり、有意水準99%で帰無仮説が棄却された。

同様に、流域平均降水量から残流域流出量を推定する線形重回帰式を作成した。残流域流出量には、池田ダムの流入量から早明浦ダムの放流量を差し引いた値を用いた。1996年1月から2005年12月までの10年間の流域降水量、早明浦ダム放流量、池田ダム流入量の日観測値を用いて重回帰分析を行った結果、以下の重回帰式が得られた。

$$\begin{aligned} o(t) &= b_1 \cdot p(t) + b_2 \cdot p(t-1) + b_3 \cdot p(t-2) + b_4 \cdot o(t-1) + b_5 \cdot o(t-3) \\ &\begin{cases} b_1 = 0.37581 & b_2 = 0.37070 & b_3 = -0.07411 \\ b_4 = 0.35023 & b_5 = 0.03077 \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

ここに、 $o(t)$ は第 t 期における残流域流出量である。重決定係数は0.758であり、各偏回帰係数について帰無仮説: $b_i=0$ ($i=1, \dots, 5$) で検定した結果、 p 値はいずれも 10^{-3} 未満であり、有意水準99%で帰無仮説が棄却された。

続いて、上記で作成された回帰式を用いて、アンサンブル予報GPVを使って推定された流域降水量から、適用期間における早明浦ダム流入量と早明浦ダム残流域流出量の推定を行った。Fig. 2 にアンサンブル平均予報GPVから算出した早明浦ダム流入量の及び残流域流出量の推定結果を示す。ただし、図は、新しい予報が週に1度発表されるごとに、前日までのダム流入量・残流域流出量・降水量の実測値を回帰式に代入して7日先までの流入量・流出量を予測した結果を1年分連ねたものを表している。

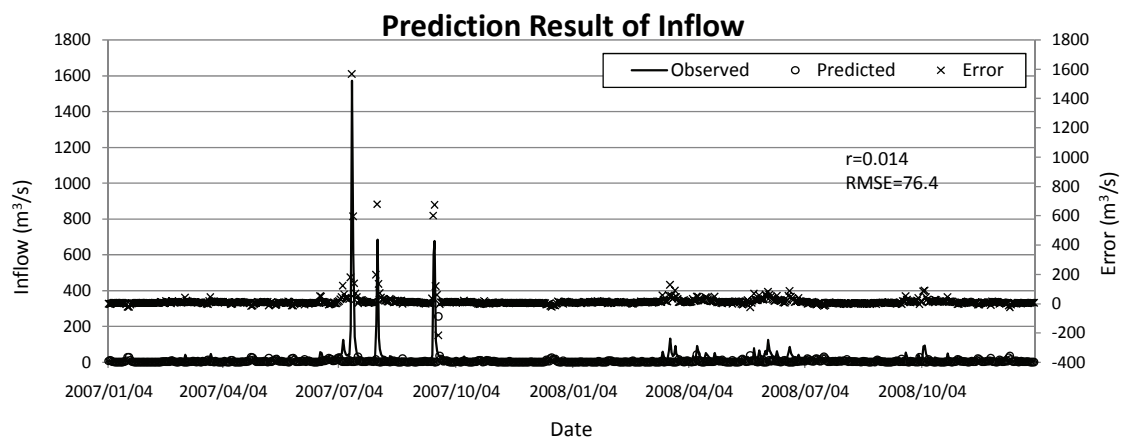


Fig. 2 (a) Prediction result of inflow into Sameura reservoir

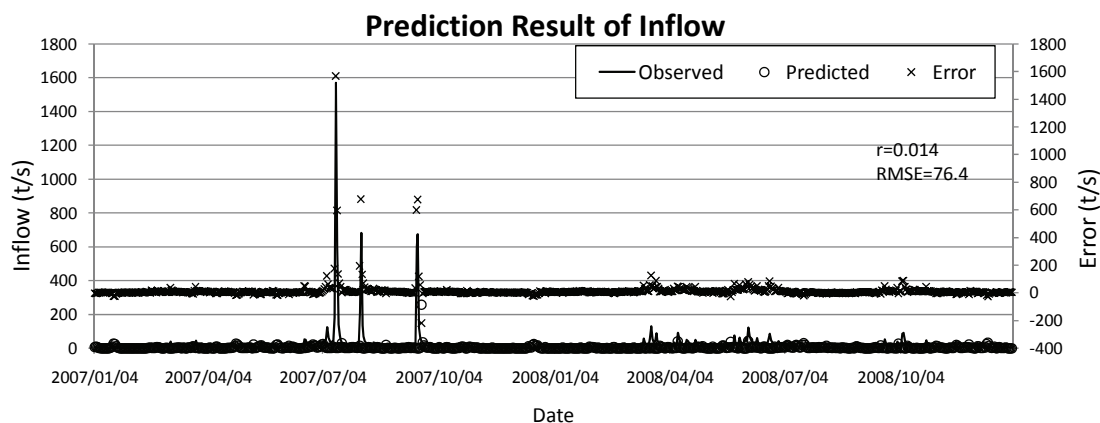


Fig. 2 (b) Prediction result of runoff between Sameura reservoir and the assessed point

Fig. 2 から見て取れるが、いずれも相関係数が0.1未満となり、予測精度は良くなかった。これは、流域平均降水量の推定精度が悪かったことが原因であると考えられる。本研究では、流域降水量の推定に周辺の2.5°間隔の格子点上の予報GPVの単純平均を用いた。これは、降水量の予報GPVがフラックスを表わしていることに照らすと、その格子点が代表する周辺地域の平均的な降水量の値を用いたということになる。予報GPVを流域降水量の予測値としてそのまま用いることは、地形上、降水を受けやすい山岳地域を比較的多く擁する本研究の対象地域においては、降水を系統的に過小評価をしている可能性が考えられ、このことが流域降水量の推定精度の悪さの原因であると考えられる。流域降水量の予測手法に関しては、特に予報GPVの格子規模よりも予測対象とする流域が小さい場合においては、降水量以外の気象要素を用いて降水の物理過程を考慮に入れる

など、ダウンスケール過程における降水の非一様性の表現方法について、今後検討の必要がある。しかしながら、本研究の目的はアンサンブル予報利用時における前述の3つの最適放流決定モデルの放流決定過程の相違の比較であり、予測の精度が良いことが必要不可欠ではないことから、本予測結果を用いて最適化計算を行い、降水量が全般的に低く見積もられた場合に各モデルがどのような決定を行うかについて考察を行った。

4.3 各モデルの最適放流決定過程の相違

1か月アンサンブル予報の降水量予報値を用い、利水目的に着目した貯水池操作の最適化を行った。最適化計算には、アンサンブル平均予報を用いた決定論的DP (DDP/EPP1)、アンサンブルメンバー別予報を用いた確率DP (SDP/EPP1)、アンサンブルメンバー別予報を用いたSampling SDP (SSDP/EPP1) の3つモ

Table 2 Averaged damages as a result of reservoir operations optimized by DP-based models (m³/sec)

Applied Model	2007	2008	2007 to 2008
DDP/Perf	0.760	0.603	0.682
DDP/Ave	5.41	5.18	5.29
DDP/EPP1	3.04	2.77	2.91
SDP/EPP1	2.83	3.74	3.29
SSDP/EPP1	2.68	3.56	3.12
Actual Operation*	0.670	1.30	0.987

* Excluding potential damage caused by alternative release for water use from capacity for power generation into calculation of damage.

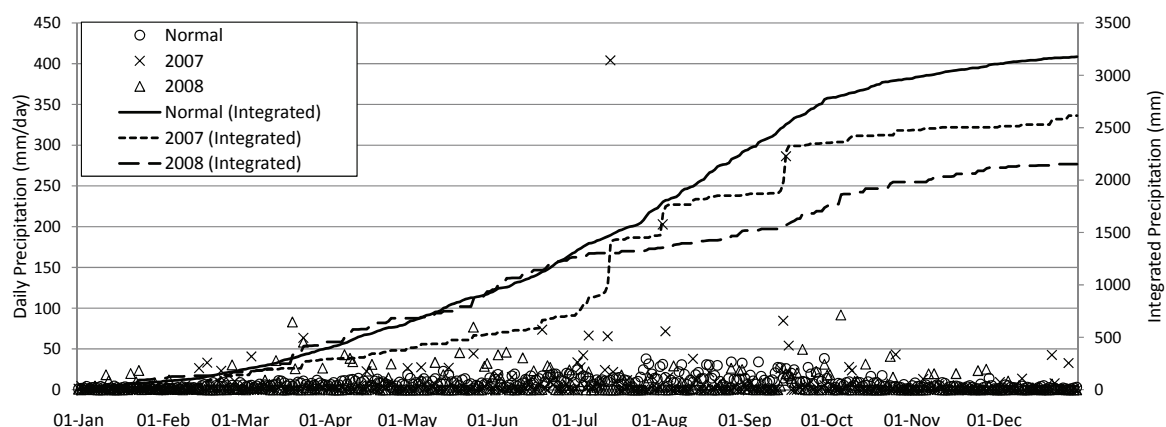


Fig. 3 Observation of precipitation in applied period

デルを用いた。これらのモデルによって算出された最適放流に従って貯水池操作を行った結果をTable 2に示す。ここで、Table 2の中のDDP/Perfは実測値を予測（完全予報）と見なし決定論的DPを用いて算出した最適放流決定に従った場合の操作結果、DDP/Aveは気候値を予測と見なし決定論的DPを用いて算出した最適放流決定に従った場合の操作結果を示している。

Table 2に示すように、適用を行ったモデルの中では、完全予報を用いたDDPモデルに基づく操作が最も渇水被害を小さく抑えることができ、操作結果が良かった。しかし、完全予報を用いたにも関わらず、実際の操作よりも被害が大きくなった。本研究では評価地点における需要量を水資源開発量と同量に設定したが、実際の需要量は年ごとの水利状況に基づいて定められ通常開発量よりは小さいことから、需要量の設定が現況より過大であったことによるものと考えられる。また、2008年に行われた発電容量からの緊急放流に伴う発電被害についても、Table 2に示す実操作の被害には含まれていない。

一方、各モデルを用いた操作結果のうち、最も渇

水被害が大きかったのは、気候値を用いたDDPモデルに基づく操作であった。これは、適用年である2007年、2008年の吉野川流域における降水量が全体的に平年を大きく下回り（Fig. 3）、それに伴い流況も気候値を下回っていたことが要因と考えられる。

予報を用いた3種のDPモデルに基づく操作結果は、いずれも完全予報を用いた場合と比較すると被害が大きくなったが、気候値を用いたDPモデルと比較して被害を小さく抑えることができた。このことは、本適用の流況予測情報のように比較的精度の低い予測情報を用いた場合でも、予測情報がある程度有用であることを示している。

予報と決定論的DPを用いた操作結果は、予報とSDPモデルもしくはSSDPモデルを用いた操作結果と比較して、2007年では被害が大きかったが、逆に2008年では被害が小さかった。この原因については、次のように考えられる。

Fig. 3は適用期間における観測降水量の推移を示している。図に示すように、2007年においては降水量は平年値よりも継続的に低く推移したが、2008年においては7月頃まで平年と同程度の降水があり、そ

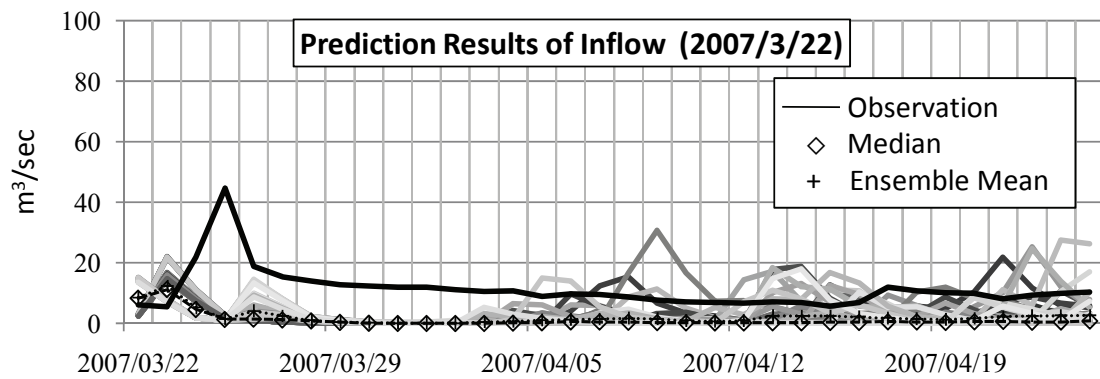


Fig. 4 (a) Ensemble prediction of inflow into Sameura reservoir on Mar. 22, 2007

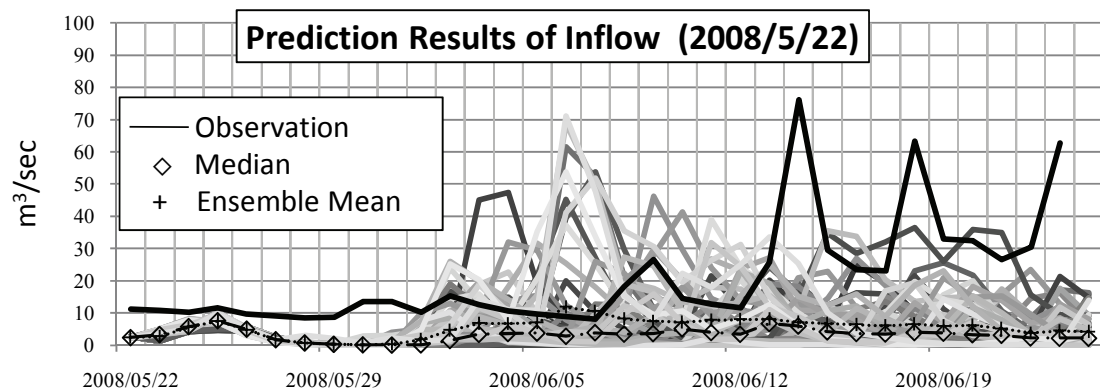


Fig. 4 (b) Ensemble prediction of inflow into Sameura reservoir on May. 22, 2008

の後少雨傾向が見られた。一方、気象庁アンサンブル予報発表日から行った34日先までの早明浦ダム流入量の予測例をFig. 4 に示す。これらの図から分かるように、予測流況のアンサンブル平均は観測値よりも継続的に低く見積もられている。また、これらのアンサンブル予測値の中央値は、平均値よりもさらに低く推移していることが確認できる。同様の特徴は、その他の予報発表日に実施した予測結果においても見られた。本研究では、放流最適化の目的関数である渇水被害を表す関数に不足水量の二次関数を採用していることを考慮すると、SDPやSSDPを用いた最適放流決定に基づく貯水池操作の性能は、アンサンブル予測の平均値より、むしろ中央値の影響を受けると考えられる。なぜなら、SDPとSSDPを用いた最適化計算では、各予測系列においてまず不足水量の二次関数である将来被害関数を計算してから系列間の平均を取るのに対し、DDPを用いた最適化計算では、まず不足水量の算定に先立って予測系列の平均を行い、その平均流況をもとに不足水量、将来被害関数を行うからである。適用期間では、アンサンブル流況予測の中央値は全体的に平均値よりも

低く推移したため、SDPやSSDPを用いた最適化モデルでは、DDPを用いたモデルと比べ、予測期間である34日先までの流況をより低く解釈し、その結果、より慎重な操作を選択したと考えられる。

DDPモデルとSDPモデル及びSSDPモデルの操作結果の相違は、特に2008年3月から同年10月にかけての期間で顕著であった。SDPモデル、SSDPモデルを用いた操作では、期間の前半において、しばしば需要水量を超える過大な放流がなされた。逆に、期間の後半においては、貯水量の低下に伴い、需要水量を下回る放流がなされる傾向にあった。期間の前半で過大な放流がなされたのは、SDPやSSDPを用いた最適化モデルでは、DDPを用いたモデルと比較して、34日先までの近い将来の流況が少なく見積もられたことを重要視し、貯水量の低下に伴う将来の水不足のリスクよりも、目下の渇水回避を優先し放流量を多く算定したためである。実際には、この期間前半においては平年と同程度の降水があったため (Fig. 3) , 結果として、継続して過大な放流 (無効放流) を行っていた形となった。このことが、貯水量の急激な低下を招き、その結果期間後半に貯水不足から

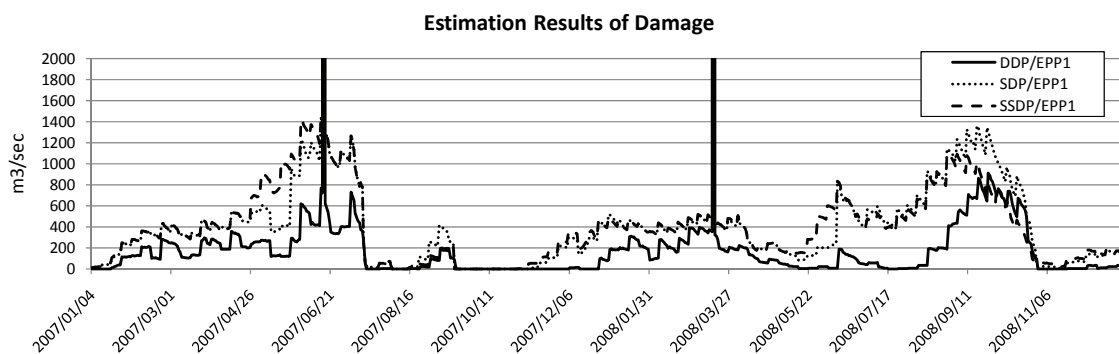


Fig. 5 Estimation of damage by water deficit (summation of daily averaged water deficit for subsequent one year)

需要量に相当する放流を行うことができず、ひいては水不足を増大させることとなったと考えられる。以上の結果は、予測の確率的性質を考慮したDPモデルが、これを考慮しないDPモデルと比較して、必ずしも良い操作結果をもたらすとは限らないことを示している。

貯水池操作の最適化問題においては、渇水被害や洪水被害、あるいは発電による便益などの目的関数の算定にしばしば高次関数や指数関数が用いられる。一方、降水や流量などの水文変量の分布特性は、本適用におけるアンサンブル流況予測が持つ特徴と同じように、中央値が平均値よりも小さいことが多い。このことから、水文変量に関するアンサンブル予測を長期貯水池操作に導入する場合、予測系列群の平均値と中央値の関係を考慮することは有用であると考えられる。

最後に、将来被害関数の算定結果をFig. 5に示す。Fig. 5からも、DDPモデルが他の二つのモデルと比較して、渇水被害を全般的に小さく見積もっていることが分かる。また、SDPモデルとSSDPモデルの算定結果の違いについては、SDPモデルでは、SSDPモデルに遅れて被害のピークを算定していることがうかがえる。SSDPモデルに基づく貯水池操作では、SDPモデルに基づくものと比較して、両適用年とも被害が少なかった (Table 2)。しかし、本適用では、これがどのような原因によってもたらされるのかを検証するには至らなかった。今後さらに適用を行い、検討を加えたい。

6. おわりに

本稿では、アンサンブル予測と組み合わせた場合の3つのDPモデル、すなわち決定論的DP、確率DP、Sampling Stochastic DPの長期利水操作における最適放流決定過程の違いについて分析を行った。その結

果、決定論的DPと確率DP及びSampling Stochastic DPとの最適放流決定過程の相違が明らかになり、アンサンブル予測を用いる場合にその分布特性を慎重に考慮に入れることが必要であることが確認された。特に、アンサンブル予測に含まれる予測系列の平均値と中央値の関係と予測精度と併せて見ることによって、最適化モデルとして決定論的DPを採用するのか、あるいは確率DPやSampling Stochastic DPを採用するのかを判断することができる可能性を示した。一方、確率DPとSampling Stochastic DPとの最適放流決定過程については、両者の計算結果に一定の違いが確認できたものの、その原因を明らかにするまでには至らず、今後の課題であると考えられる。

謝 辞

本研究で用いた流域降水量データは、独立行政法人水資源機構吉野川局池田総合管理所より提供していただいた。また、アンサンブル予測データはKAGI21 (Kyoto University Active Geosphere Investigations for the 21st Century COE Program, 京都大学21世紀COEプログラム, 「活地球圏の変動解明 アジア・オセアニアから世界への発信」) の一環として収集され、地球流体電脳倶楽部WEBサイト (<http://www.gfd-dennou.org/>) で提供されている、気象庁1か月アンサンブル予測GPVデータを利用した。これらの関係者の皆様に対し、ここに深く謝意を表する。

参考文献

- 新井信雄, 丸山信雄 (1979) : ベイズ決定問題としての渇水予測—長期気象予測の活用—, 第23回水理講演会講演論文集, pp.269-273.
- 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎 (1983) : 情報

- 量統計学, 北川敏男編, 共立出版株式会社, 236 pp.
- 池淵周一・小尻利治・宮川裕史 (1990) : 中・長期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.
- 経田正幸 (2006) : アンサンブル予報概論, 数値予報課報告・別冊, 気象庁予報部編, 第52号, pp.1-12.
- 古川武彦, 酒井重典 (2004) : アンサンブル予報—新しい中・長期予報と利用法—, 株式会社東京堂出版, 284 pp.
- 藤部文昭・村上正隆・越田智喜・吉田一全 (2008) : 早明浦ダム周辺の降水量とダム貯水量の変動特性, 天気, 55巻, 6号, pp.21-25 (469-473) .
- 水資源機構 (2004) : 輝く21世紀のくらしと水～四国の水資源～, 独立行政法人水資源機構吉野川局, p.13.
- 吉谷純一 (2007) : 2006年度春季大会シンポジウム「異常気象に挑む—極端な降水現象の理解と予測を目指して—」の報告5. 洪水・低水管理のための降雨予測技術発展の展望, 天気, 54巻, 7号, pp.631-634.
- 和田一範, 川崎将生, 富澤洋介 (2005) : 河川の高水管理における予測降雨情報の適用性に関する考察, 水文・水資源学会誌, 第18巻, 第6号, pp.703-709.
- Akaike, H. (1974): A new look at the statistical model identification, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 19, pp.716-723.
- Bellman, R. (1957): Dynamic Programming, Princeton University Press., Princeton, New Jersey, U.S.A., 340pp.
- Faber, B. A. & Stedinger, J. (2001): Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts, Journal of Hydrology, Vol. 249, pp. 113-133.
- Kelman, J. & Stedinger J. R. (1990): Sampling Stochastic Dynamic Programming Applied to Reservoir Operation, Water Resources Research, Vol. 26, No. 3, pp. 447-454.
- Kim, Y. O., Eum, H. I., Lee, E. G. & 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, Vol. 133, No. 1, pp. 4-14.
- Kojiri, T., K. Tomosugi and C.V. Galvao (1994): Knowledge-Based Decision Support System of Real-Time Reservoir Operation for Drought Control, J. Japan Soc. Hydro & Water Resour., Vol. 7, No. 3, pp.188-195.
- Labadie, J. (2004): Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 130, No. 2, pp.93-111.
- Loucks, D. P., Stedinger, J. R. & Haith, H. A. (1981): Water Resources Systems Planning and Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, U. S. A., 559pp.
- Nandaldal, K. D. W. and J. J. Bogardi. (2007): Dynamic Programming Based on Operation of Reservoirs - Applicability and Limits -, International Hydrological Series, Cambridge University Press, UK, 130pp.
- Yeh, W. (1985): Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review, Water Resour. Res., Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818.

A Study on Water Release Decision Process of Optimization Models in the Application of Ensemble Forecast to Long-term Reservoir Operation

Daisuke NOHARA, Ami TSUBOI* and Tomoharu HORI

* School of Engineering, The University of Tokyo

Synopsis

Optimizing processes of three DP-based models are analyzed through the application to optimization of long-term reservoir operation, especially focusing operation for water use. One-month ensemble forecast of precipitation provided by JMA is introduced to long-term reservoir operation. Ensemble inflow scenario is then predicted from estimated precipitation scenario by use of regression model. Optimization of long-term reservoir operation which only focused on water utilization is conducted by use of predicted inflow scenario. Through the application to Sameura reservoir in the Yoshino River basin, it was shown that distribution characteristics of ensemble prediction such as relationship between normal and median value can be an index for decision of employment of optimization model, with consideration of prediction error tendency.

Keywords: long-term reservoir operation, ensemble forecast, DP, water release optimization