

長期貯水池最適操作へのアンサンブル降水予報 の活用方法に関する基礎的検討

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE APPLICATION OF ENSEMBLE FORECAST
OF PRECIPITATION TO LONG-TERM RESERVOIR OPERATION

野原大督¹・坪井亜美²・堀智晴³
Daisuke NOHARA, Ami TSUBOI, Tomoharu HORI

¹正会員 工修 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²学生会員 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Optimization processes of three DP-based models are analyzed through the application to optimization of long-term reservoir operation, especially focusing long-term operation for water use. One-month ensemble forecast of precipitation provided by Japan Meteorological Agency is introduced to long-term reservoir operation. Ensemble streamflow scenarios are then estimated from forecasted precipitation scenario by use of regression models. Optimization of long-term reservoir operation which only focuses on water use is conducted by use of estimated streamflow scenarios. Through the application to Sameura reservoir in the Yoshino River basin, it was shown that there is a possibility to judge which DP model is better for application to reservoir operations, by considering distributional characteristics of applied ensemble forecast.

Key Words : Reservoir operation, ensemble forecast, DP, sampling stochastic DP, optimization

1. 序論

ダム貯水池操作の計画的・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。我が国の河川管理においては、近年、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などの判断に、降水予測や台風進路予測を行っているところもある¹⁾。また、和田ら²⁾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関しては、気象庁が発表している中・長期気象予報を定量的に活用した数カ月先までの長期的な降水量の予測手法について研究されているが³⁾、予測のリードタイムが数週間～数カ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、実管理での利用には至っていない。予測精度のこのような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⁴⁾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きてい

る。これらの複数の数値予報（メンバと呼ばれる）を考慮することによって、最終的に総合された予報値のみならず、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。こうした予報メンバの予報分布特性を考慮に入れて放流意思決定を行うことができれば、従来の単一の予報を利用することと比較して、より安定した操作を行うことができると考えられる。このことから、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い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放流決定手法に関する研究が行われている。Faber and Stedinger⁵⁾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、予測情報と過去の統計情報を考慮した貯水池の放流決定手法を提案している。また、Kim et al.⁶⁾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、貯水池の放流決定手法を提案している。いずれ

の研究においても、決定論的DP (DDP), 確率DP (Stochastic DP, SDP), または確率的DPの一種である Sampling Stochastic DP (SSDP) といった最適計算モデルを用いて、与えられた予報の下での最も確からしい放流戦略を決定しており、各モデルを用いた場合の操作結果の比較を行った上で、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、放流意思決定に用いられる最適計算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ることで実際にどのような放流意思決定手法を採用すればよいかを判断するために、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三つのDPモデル (DDP, SDP及びSSDP) を与えられた予報の下での最適放流計算に用いた長期貯水池操作の実時間放流意思決定モデルを構築し、三つの最適化モデル間の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推定

気象庁が提供する中長期アンサンブル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・寒候期予報がある。本研究では、これらのうち、データの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と考えられる。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時系列 (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こ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. 長期貯水池操作最適化のためのDPモデル

(1) DPモデルの概要

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^{7), 8)}、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られる。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。

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

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³⁾と同様に、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、不足量と不足率の積として以下のように定義できる。

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

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。

一方、制約条件には、ダム貯水池の物理的あるいは操作上の理由から管理規則等により定められている放流量及び貯水量の最大値、最小値が用いられる。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。

$$s_{t+1} = s_t + i_t - r_t - \alpha_t \quad (3)$$

ここに、 s_t は第 t 期期首における貯水量、 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。

$$\begin{aligned} f_T(s_T) &= \min_{q_T} H_T(q_T) \\ f_t(s_t) &= \min_{q_t} \{H_t(q_t) + f_{t+1}(s_{t+1})\} \quad (t=1, \dots, T-1) \end{aligned} \quad (4)$$

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(3)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。

$$r_t^* = \min_{q_t} \{H_t(q_t) + f_{t+1}(s_{t+1})\} \quad (t=1, \dots, T-1) \quad (5)$$

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、本研究では、アンサンブル平均予報値を用いた最適化放流決定に、このモデルを用いる。

(2) 確率DPモデル

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手法として確率DP (SDP) がある。確率DPの関数方程式は、一般に以下のように記述される⁶⁾。

$$\begin{aligned} f_t(s_t) &= \min_{q_t} E \left\{ H_t(q_t) + E [f_{t+1}(s_{t+1})] \right\} \\ (s_{t+1} &= s_t + i_t - r_t) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、流入量・流出量の予測時系列群は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全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、目的関数及び関数方程式はそれぞれ以下ようになる。

$$\min_{q_t} \sum_{i=1}^T \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M H_t(q_t^m) \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} f_t(s_t) &= \min_{q_t} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left\{ H_t(q_t^m) + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M f_{t+1}(s_{t+1}^m) \right\} \\ (q_t^m &= r_t + o_t^m, \quad s_{t+1}^m = s_t + i_t^m - r_t) \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)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。

$$r_t^* = \min_{q_t} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \{H_t(q_t^m) + f_{t+1}(s_{t+1}^m)\} \quad (9)$$

(3) Sampling Stochastic DP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⁹⁾。

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。

$$\begin{aligned} f_t(s_t, m) &= \min_{q_t} \{H_t(q_t^m) + f_{t+1}(s_{t+1}^m, m)\} \\ (q_t^m &= r_t + o_t^m, \quad s_{t+1}^m = s_t + i_t^m - r_t) \end{aligned} \quad (10)$$

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 期以降に受ける洪水被害の総和、 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。全ての予測流況時系列が実現する確率を一様と考えると、次式のようになる。

$$\min_{q_t} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \{H_t(q_t^m) + f_{t+1}(s_{t+1}^m, m)\} \quad (11)$$

一方、目的関数については、確率DPと同様に式(7)を用いる。

4. 適用と考察

(1) 適用流域の設定

構築したモデルを、吉野川流域の早明浦ダムについて、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した。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不足量 (洪水被害) 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、図-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、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。

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、貯水池諸元の物理的あるいは規則上の制約を用いて、以下のものを考えた。

$$0(\text{m}^3) \leq s_t \leq 173 \times 10^6 (\text{m}^3) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} 0 \leq r_t \leq 2000 (\text{m}^3/\text{sec}) & \quad \text{in case } i_t > 800 (\text{m}^3/\text{sec}) \\ 0 \leq r_t \leq 800 (\text{m}^3/\text{sec}) & \quad \text{in case } i_t \leq 800 (\text{m}^3/\text{sec}) \end{aligned} \quad (13)$$

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年間にわたっての洪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。

$$\begin{aligned} f_{365}(s_{365}) &= \min_{r_{365}} H_{365}(q_{365}) \\ f_t(s_t) &= \min_{r_t} \{H_t(q_t) + f_{t+1}(s_{t+1})\} \quad (t = 34, \dots, 364) \end{aligned} \quad (14)$$

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平年流況を用いた。

(2) アンサンブル流況予測時系列の推定結果

以下に適用結果を示す。まず、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が、統計的に十分な期間の予報データを用意できなかったことから、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、回帰式を用いず、4格子点における予報GPVの単純平均値を用いた。

続いて、流域平均降水量から早明浦ダムへの流入量と残流域流出量をそれぞれ予測する二つの回帰式を、1979年1月から2005年12月までの27年間の日観測値を用いて作成し、適用期間における早明浦ダム流入量と残流域流出量の推定を行った。ここでもやはり、流域平均降水量の推定精度の悪さが影響し、いずれも観測結果との相関

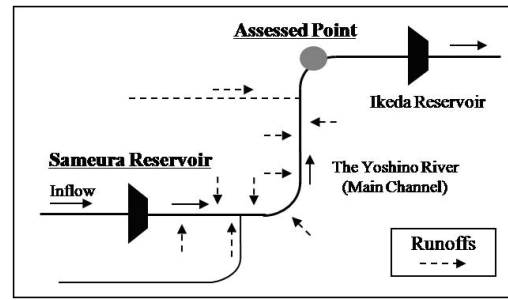


図-1 単純化された適用流域モデル。

係数が0.1未満となり、予測精度は良くなかった。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。このような比較的大きな格子点上の予報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一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は、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。以下では、上記の結果を用いて、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う。

(3) 各最適化モデルの放流決定過程の相違

貯水池操作の最適化計算には、アンサンブル平均予報を用いた決定論的DP（DDP/EPP1）、メンバー別予報を用いた確率DP（SDP/EPP1）、メンバー別予報を用いたSSDP（SSDP/EPP1）の三つのモデルを用いた。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表-1に示す。ここで、表-1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を用いた場合の操作結果を示している。

表-1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洪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が原因と考えられる。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考慮されていないことも、原因の一つと考えられる。

予報を用いた三種の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

表-1 各DPモデルによる操作の結果生じた平均被害 (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.

を小さく抑えることができた。このことは、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可能性を示している。

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、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。

適用期間では、2007年において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図-2に示す。図-2に示されているように、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、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モデルと確率論的DP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。図-3にDDPモデル及びSSDPモデルの操作結果を示す。なお、SDPモデルの操作結果については、DDPと比較してSSDPモデルの操作結果に類似していたためここでは割愛する。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

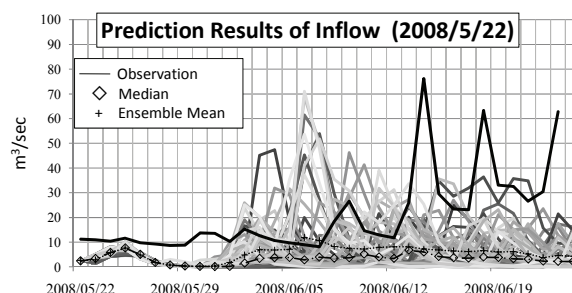


図-2 ダム流入量の予測結果例 (2008年5月22日予測分)。

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、確率論的DP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と考えられる。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、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、これを考慮しないモデルと比較して、予報の分布特性や貯水池の状態によっては必ずしも良い操作結果をもたらさ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報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が有用である可能性がある。

SDPモデルとSSDPモデルの算定結果の違いについては、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(表-1)。しかし、本適用では、これがどのような原

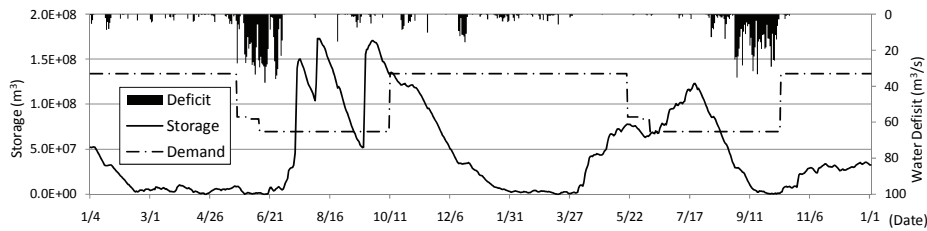


図-3(a) DDPモデルの操作結果 (DDP/EPP1) .

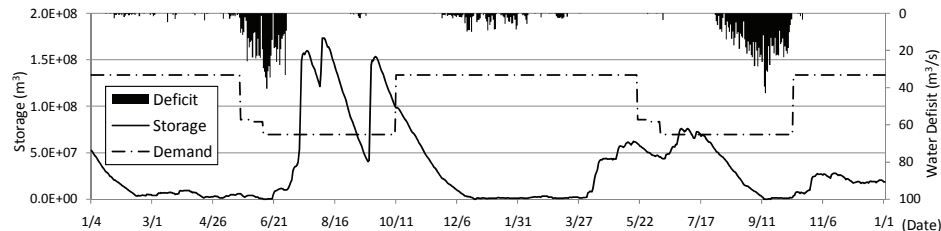


図-3(b) SSDPモデルの操作結果 (SSDP/EPP1) .

因によってもたらされた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。

5. 結論

本稿では，アンサンブル予報と組み合わせた場合の三つのDPモデルの長期利水操作における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SSDPとの放流決定過程の相違が確認され，アンサンブル予報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。平均値と中央値などの関係といった予報系列の分布特性と予測精度と併せて見ることが，最適化モデルとして決定論的DPを採用するのか，あるいは確率論的なDPを採用するのかを判断できる可能性を示した。一方，確率DPとSSDPとの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，本研究ではその原因を明らかにするまでには至らなかった。他流域における適用や異なる分布的特性を持つアンサンブル予報を用いた適用を行うなど，さらなる検討が必要であり，今後の課題である。

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いただいた。また，アンサンブル予報データは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報GPVデータを利用した。これらの関係者の皆様に対し，深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉谷純一: 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, 2007.
- 2) 和田一範, 川崎将生, 富澤洋介: 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, 2005.
- 3) 例えば, 池淵周一, 小尻利治, 宮川裕史: 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, 1990.
- 4) 経田正幸: 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, 2006.
- 5) Faber, B. A. and Stedinger, J.: Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts, Journal of Hydrology, Vol. 249, pp. 113-133, 2001.
- 6) Kim, Y. O., Eum, H. I., Lee, E. G. & Ko, I. H.: Optimizing Operational Policies of a Korean Multireservoir System Using Sampling Stochastic Dynamic Programming with Ensemble Streamflow Prediction, J. of Water Resources Planning and Management, Vol. 133, No. 1, pp. 4-14, 2007.
- 7) Yeh, W.: Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review, Water Resour. Res., Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818, 1985.
- 8) Labadie, J.: Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review, J. of Water Resources Planning and Management, Vol. 130, No. 2, pp.93-111, 2004.
- 9) Kelman, J. & Stedinger J. R.: Sampling Stochastic Dynamic Programming Applied to Reservoir Operation, Water Resources Research, Vol. 26, No. 3, pp. 447-454, 1990.

(2009. 9. 30受付)