

# 気候変動による利水への影響を踏まえた ダム貯水池群の最適操作に関する研究

RESEARCH ON THE OPTIMAL OPERATION OF A GROUP OF DAM RESERVOIRS  
CONSIDERING THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON WATER AVAILABILITY

川村一人<sup>1</sup>・中津川誠<sup>2</sup>・杉原幸樹<sup>3</sup>

Kazuto KAWAMURA, Makoto NAKATSUGAWA and Kouki SUGIHARA

<sup>1</sup> 学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

<sup>2</sup> 正会員 博士(工学) 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

<sup>3</sup> 正会員 理修 (株) 福田水文センター (〒001-0024 札幌市北区北 24 条西 15 丁目 2-5)

This paper addresses the optimal operation of a group of dam reservoirs in a snowy region for adaptation to the water shortages that are expected to result from climate change. In snowy regions, climate change is likely to cause snow accumulation to decrease. This is expected to shift the snow-melting season earlier, to decrease river discharge and, consequently, to reduce water availability. Thus, the operation of existing dams should be improved. Research was made on the operation of two multipurpose dams in the Toyohira river basin, which supplies water to Sapporo (population 2 million). Using reproductions (1981-2000) and projections (2081-2100) provided by the Regional Climate Model (RCM20) of the Japan Meteorological Agency, we estimated the optimal operation of a group of reservoirs by dynamic programming. The simulation suggests that shortages of dam storage will occur if each dam is operated separately, but that coordinating the discharge operations of two dams can make up for those shortages.

**Key Words :** *climate change, snowy regions, optimal operation of a group of dam reservoirs, dynamic programming, measures for adapting to changes in water availability*

## 1. はじめに

北海道, 東北, 関東, 北陸などの積雪地域では, 雪は貴重な水資源であり, 灌漑用水や生活用水, 発電用水等の重要な供給源である. 気候変動による気温上昇により, 積雪の減少, 融雪期の早期化や融雪出水の減少が予想され, 水利用への影響が懸念されている<sup>1)</sup>. 一方, 局地的な豪雨の発生や夏期以外の大雨の増加により治水安全度の低下も指摘され<sup>2)</sup>, その影響に対する適応策の検討が求められている. さらに財政や環境保全上の制約から新規施設の建設は難しく, 既存施設の有効活用がより重要となり, 既存ダム運用方法の改善は有効な手段といえる.

ダムの最適操作の代表的な決定法には動的計画法による貯水池操作<sup>3), 4)</sup>があり, 近年では, 治水では佐山ら<sup>5)</sup>, 利水では野原ら<sup>6)</sup>の研究事例がある. また, 気候変動を考慮した利水適応策の研究としては Lopez ら<sup>7)</sup>が気候変動の不確実性を考慮した水資源管理を, Raju ら<sup>8)</sup>が確率的計画法を用いた貯水池最適操作を提案している.

このように気候変動に対する利水適応策の研究が増えてきた中で, 日本の積雪地域の水文条件で気候変動を考

慮した利水適応策の研究はあまりされていない.

このような背景から, 本研究では, 融雪の減少など気候変動による影響が懸念される積雪地域の利水環境に着目し, 将来の流出状況の変化と利水への影響を推定し, それに対する対応策としてダム運用方法について検討した. ダム運用方法の検討には動的計画法により最適操作を推定した. 対象流域である豊平川流域には人口約 200 万人の札幌市があり, その水資源管理は重要な課題である. 具体的な手順は以下の通りである.

- 1) 気象庁・気象研究所の地域気候モデル RCM20<sup>9)</sup>のデータに含まれるバイアスを補正し, 現況と将来のダム流入量を水循環モデルにより試算した.
- 2) 試算した平均ダム流入量と実績利水放流量の月平均値を用いて, 現況と将来の平均的なダム貯水量の変化を推定するとともに, 現況の放流操作で生じる将来的な水不足に対応できるダム運用を検討した.
- 3) 動的計画法を用いて, ダム単体での放流操作で生じる問題を示し, ダム連携による最適操作を検討した.

以上により, 単体でのダム操作では将来のダム貯水量が不足することが示唆され, その対応策としてダムの連

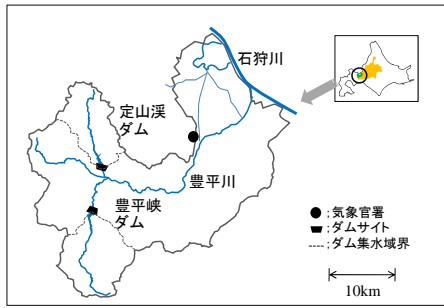


図-1 豊平川流域

携による放流操作が有効であることを動的計画法により示すことができた。

## 2. 対象流域の概要

解析対象は、図-1に示す豊平川流域である。豊平川は流路長 72.5km、流域面積 960km<sup>2</sup>であり、札幌市を南北に貫く河川である。また、札幌市民 200 万人の水道水源の約 98%は豊平川からの取水に依存している。上流部には豊平峡ダム(流域面積 134km<sup>2</sup>)と定山溪ダム(流域面積 104km<sup>2</sup>)を有し、両ダムともに洪水調節機能および発電・水道への利水を目的とした多目的ダムである。

## 3. ダム貯水量の変化推定

### (1) 水循環の定量化手法

ダム流入量を推定するためには流域内の水循環を求める必要がある。本論文では口澤ら<sup>10)</sup>の提案した流域水循環の定量化手法を利用して求めた。計算手法の概要を図-2に示す。まず、1km メッシュ単位で蒸発散量、融雪量、降雨量を近藤ら<sup>11)</sup>によって提案された2層モデルに基づいた水・熱収支法により求めた。熱収支は大気-植被層(キャノピー)-地表間の熱フラックスを定式化することで計算される。以上により算出した蒸発散量、融雪量と降雨量より流出量を算出する。流出量の推定には、上流側メッシュからの流量をkinematic wave式を用いて河道追跡し、メッシュ内で生じる流出量を3段タンクモデルで計算し、これらの合計値を下流メッシュへの流入量とした。

### (2) メッシュデータ

水・熱収支計算に用いるメッシュデータは、川村ら<sup>1)</sup>が作成したデータを使用した。作成手法の概要を以下に示す。気象データは日単位を基本とし、気象庁・気象研究所により開発された地域気候モデル RCM20<sup>9)</sup>の温暖化予測実験結果を使用した。計算には気温、気圧、風速、比湿、雲量、降水量、降雪量を使用し、期間は現況期間の1981~2000年と将来期間の2081~2100年の計40年分の計算を行った。また、気候モデルの再現結果と実際の観測値の間にはバイアスが含まれるため、モデル出力値を補正して使用した。バイアス補正手法は藤原ら<sup>12)</sup>が行

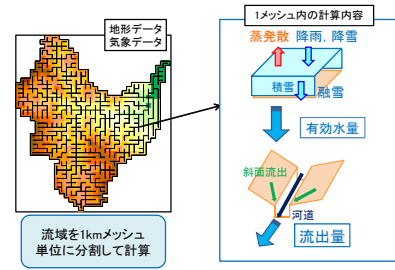


図-2 水循環の定量化手法概要

った月平均気温や月降水量といった月単位での平均値や分散などの確率分布が保存されるように補正を行う手法を適用し、ここではRCM20 データと札幌の観測値の確率分布が合うように、気温、降水量、降雪量、風速、湿度の5項目で補正を行った。また、RCM20の公表データとして提供されていない湿度は気温、気圧、比湿からデータを作成し、同じく提供されていない日射量は快晴日の全天日射量の日平均値<sup>11)</sup>を推定し、それをRCM20の雲量で減衰させた値を使用した。また、水循環計算では相対湿度を用いた雨雪判別式<sup>11)</sup>を用いて、降雨か降雪か判別し、降雨の場合には降水量データを降雨量として使用し、降雪の場合には降雪量データを使用して計算を行った。

なお、メッシュデータの作成方法の妥当性に関しては川村ら<sup>1)</sup>により検証されているので本論文では省略する。

### (3) ダム貯水量の計算

水循環の定量化により求めた流出量の将来変化がダム貯水量に与える影響について検証するために、ダム貯水量をモデルにより計算した。

本来のダム貯水池では時間単位での放流操作規則が設定されているが、本研究では1日単位の流出計算を行っているので放流操作も1日単位を基本としたモデルを作成した。計算のモデル化の概略を以下に示す。

#### a) 操作規則

豊平峡ダムと定山溪ダムは洪水調節、発電放流、水道用水を目的として放流が行われている多目的ダムで、流入量や制限水位といった諸量の関係から放流量が決定される。治水のためには操作規則に則って放流操作が行われているが、利水放流量の決定には需要量に応じて人為的な判断が必要となるので厳格なルール化は難しい。ダム管理を考える上では渇水年や年々変動の考慮が必要になるが、将来の変動パターンが流域スケールでどのようになるかについては評価が定まっていない。また、将来の水需要量の変化も本研究では考慮していない。そこで本研究では流入量の平均値を用いたダム操作を考え、現況、将来ともに実績利水放流量の平均値を用いることで現況の利水放流操作により生じる将来のダム運用の問題点とそれへの対応策を検討することとした。

#### b) ダム流入量

① ダム流入量は現況と将来のダム貯水池運用の課題を検討するために、各々20年間の平均値を用いた。

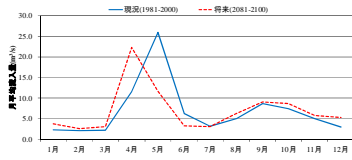


図-3 豊平峡ダムの流入量将来比較

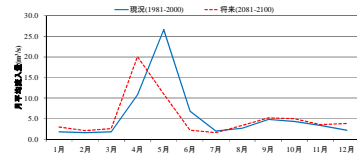


図-4 定山溪ダムの流入量将来比較

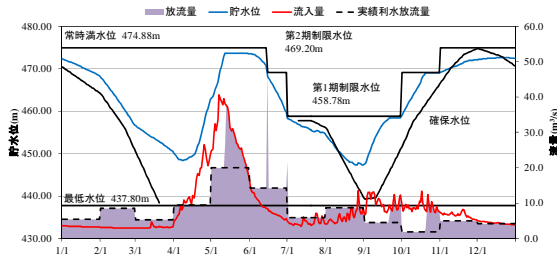


図-5 豊平峡ダムの簡易モデルの現況推定結果

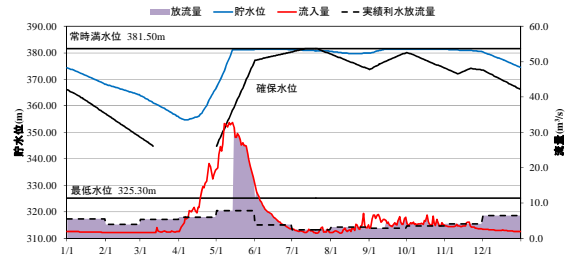


図-6 定山溪ダムの簡易モデルの現況推定結果

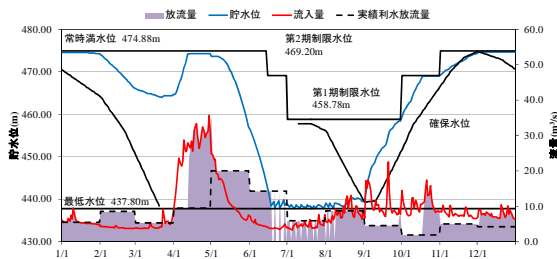


図-7 豊平峡ダムの簡易モデルの将来推定結果

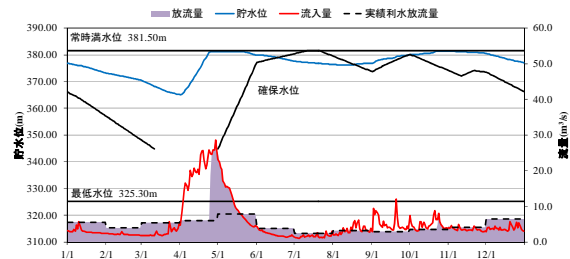


図-8 定山溪ダムの簡易モデルの将来推定結果

- ② ダム流入量は流出計算過程においてダム堤体のあるメッシュの流量をダム流入量とした。
- ③ 豊平峡ダムでは他流域(薄別川)からの発電用導水を行っており、それを加味するために現況は発電用導水実績値(1981～2000年)の月平均値を豊平峡ダムの現況計算流入量に加算し、将来の水需要は今後の社会的要因に左右されるため、ここでは現状の水需要が持続する場合の試算結果を示す。具体的には便宜的に発電用導水実績値の月平均値を豊平峡ダムの現況と将来計算月平均流入量の比で補正し、将来計算流入量に加算した。

#### c) ダム放流量

- ① 利水放流として両ダムでデータのある1993～2007年の15年間の実績値の月平均値( $\text{m}^3/\text{日}$ )を与えた。
- ② 貯水位が常時満水位または制限水位を超えた場合には洪水調節を行うものとした。
- ③ 放流によって貯水位が最低水位を下回る場合は放流量を0とした。
- ④ なお、ダム下流での水道と水力発電の水利権量は最大でそれぞれ $9.72\text{m}^3/\text{s}$ 、 $15.6\text{m}^3/\text{s}$ であり、実績取水量は、水道は2005、2006年の平均で $5.16\text{m}^3/\text{s}$ 、発電は1991～1997年の平均で $9.73\text{m}^3/\text{s}$ となっている。上記 a)～c) で示したダム貯水量の計算モデルを以後、「簡易モデル」と呼ぶ。

#### (4) 推定結果と分析

##### a) 将来予測計算結果の分析

RCM20 の出力値による現況期間と将来期間の水循環計

算の結果を比較し、利水に与える影響について分析する。図-3に豊平峡ダム、図-4に定山溪ダムの現況と将来の月平均流入量の20年平均値を示す。図より、両ダムともに現況の融雪出水のピークが5月であるのに対して、融雪が早まることによって将来の5月の流入量は半以下に減少し、4月にピークを迎える結果となった。また、微量ではあるが冬期間(12～2月)の流入量も増加する結果となった。

##### b) ダム貯水池運用の推定結果と分析

前節で示した簡易モデルを用いて、両ダムの貯水位と放流量の推定を行った。図-5に豊平峡ダム、図-6に定山溪ダムの現況期間の推定結果を、図-7に豊平峡ダム、図-8に定山溪ダムの将来期間の推定結果を示す。両ダムともに現況結果では全期間で利水放流分の放流操作を行うことができ、5月から6月に洪水調節が行われる結果となった。一方、将来結果については豊平峡ダムでは融雪出水の早まりによって4月の流入量が増加し、洪水調節が必要となった。また、5月、6月の実績利水放流量は発電用に多く使われており、将来も同様の放流を行うと5月から貯水位が大きく低下し、6月中旬から8月中旬に利水放流が行えない致命的な状況となることがわかる。定山溪ダムでも4月下旬から5月にかけて洪水調節が行われた。利水放流が行えない日は出現しなかったが、6月中旬から8月中旬に水道用水の供給のために確保すべき水位である確保水位を下回り、利水への影響が懸念される結果となった。以上より、将来のダム貯水池運用は現況の放流操作では春期の洪水調節や融雪終了後の夏期の利水放流に影響を与えることが示唆された。

## 4. ダム群最適操作のための動的計画法の適用

### (1) 動的計画法のモデルの概要

前章で示した将来のダム運用の問題点を解決するために、ダム群の連携操作による対応策を検討する。本論文ではダム群操作の最適化のために動的計画法を用いて検討を行った。動的計画法は R. Bellman<sup>13)</sup>によって提案された数理計画法の一つで、ある目的に対して時間の経過とともに多段階にわたってなされる決定過程による効果を数式にモデル化して全体の最適解を得るものであり、ダム群最適操作の決定に適している。本論文では利水操作を目的として定式化を行った。その詳細を以下に示す。

#### a) 変数の定義

ダム群最適操作の定式化のためにダム貯水池の制御系に用いる4つの変数をそれぞれ次のように決定する。決定変数は各ダムの放流量  $O_k(t)$  ( $k=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T$ )、状態変数は各ダムの貯水量  $S_k(t)$  ( $k=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T$ )、合成変数はダム下流の沿川に設けられた評価点を通過する流量  $Q_i(t)$  ( $i=1, 2, \dots, m; t=1, 2, \dots, T$ )、外乱は各ダムへの流入量  $I_k(t)$  ( $k=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T$ ) とする。ここでダムの総数を  $N$ 、評価地点の総数を  $m$ 、制御期間の総数を  $T$  とする。外乱には残流域からの流量も含まれるが、残流域の流量観測データが不十分であり、取水等の人為的な影響もあるため、安全側評価を考え対象外とした。

#### b) 制約条件

ダム操作には貯水池の諸元の物理的または規則上の制約条件が存在し、それを満たす必要がある。放流量と貯水量は操作規則により、以下のように表される。

$$O_{\min} \leq O_k(t) \leq O_{\max} \quad (1)$$

$$S_{\min} \leq S_k(t) \leq S_{\max} \quad (2)$$

ここで  $O_{\min}$  は 0、 $O_{\max}$  は操作規則により定められた最大放流量、 $S_{\min}$  は利水容量が 0 のときの貯水量で、 $S_{\max}$  は利水容量が最大の際の貯水量である。

また、ダムの貯水量は次の連続式を用いて表される。

$$S_k(t+1) = S_k(t) + I_k(t) - O_k(t) \quad (3)$$

#### c) 目的関数

最適操作の目的を利水操作とすると最適化の目的は利水需要量を満たさない場合の被害の最小化といえる。ここでは池淵ら<sup>14)</sup>を参考に以下のように定義する。

$$D_i\{Q_i(t)\} = \begin{cases} \frac{\{Q_{di}(t) - Q_i(t)\}^2}{Q_{di}(t)} & (Q_i(t) < Q_{di}(t)) \\ 0 & (Q_i(t) \geq Q_{di}(t)) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $D_i\{Q_i(t)\}$  は第  $t$  期における評価地点  $i$  の被害を表す目的関数、 $Q_{di}(t)$  は第  $t$  期における評価地点  $i$  の需要量である。この目的関数を制御期間全てで求め、その和が

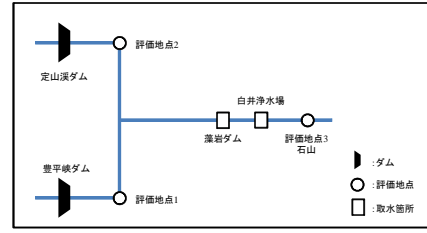


図-9 DP連携モデル

最小になるように最適化を行っていく。

#### d) 動的計画法の定式化

設定した目的関数を用いて動的計画法を定式化すると次式のような評価関数に表現できる。

$$f_t(S_1, S_2, \dots, S_N) = \min_{\substack{O_k(t) \\ S_k(t)}} \left\{ \sum_{i=1}^m D_i\{Q_i(t)\} + f_{t+1}(S_1, S_2, \dots, S_N) \right\} \quad (5)$$

ここで、 $f_t(S_1, S_2, \dots, S_N)$  は第  $t$  期から第  $T$  期までの間の目的関数の最小値を表す評価関数である。これに対して後進型の解法を用いると制御期間の第  $T$  期から第 1 期へと後進しながら  $f_t(S_1, S_2, \dots, S_N)$  を求めることで最適化問題を解くことができ、そのためには第  $T$  期における評価関数値  $f_T(S_1, S_2, \dots, S_N)$  を与える必要があり、以下のように表される。

$$f_T(S_1, S_2, \dots, S_N) = \min_{O_k(T), S_k(T)} \sum_{i=1}^m D_i\{Q_i(T)\} \quad (6)$$

したがって、式(5)、式(6)より  $f_T, f_{T-1}, \dots, f_1$  を求めて制御期間の初期貯水量となる  $t=1$  のときの各ダムの貯水量  $(S_1(1), S_2(1), \dots, S_N(1))$  を与え、 $f_1(S_1(1), S_2(1), \dots, S_N(1))$  を求めることで全体の最適解を得ることができる。

### (2) 豊平川流域への適用

前節で示した動的計画法のモデルを豊平川流域へ適用する。以下に、計算に必要な条件を示す。

#### a) 流域のモデル化

豊平川流域は第 3 章で示したように豊平峡ダム、定山溪ダムという 2 つの多目的ダムを有しており、下流の水道用水と水力発電のための放流を行っている。

本研究では、ダム単体での操作を行った簡易モデルの結果と連携操作による手法を比較するために、豊平川流域でダム単体での最適化と流域全体での最適化の 2 通りのモデル化を行った。以後、ダム単体での最適化は「DP 単体モデル」、流域全体での最適化は「DP 連携モデル」と呼ぶ。図-9 に DP 連携モデルのイメージ図を示す。DP 単体モデルの最適化には第 3 章で用いた実績利水放流量の月平均値を需要量として与えて評価した。一方、DP 連携モデルでの最適化の場合、ダム単体での最適化に加えて、ダムからの放流が合流したあとの評価地点である石山でも評価を行った。石山では発電用ダムの藻岩ダムと



白川取水場があるので、藻岩ダムと白川浄水場の取水水利権量と石山地点での維持流量の合計値を需要量として設定した。最大水利権量はそれぞれ 15.6m<sup>3</sup>/s, 9.72m<sup>3</sup>/s で、維持流量は定山溪ダム完成後の 1990～2009 年の 20 年間での 1/10 濁水流量である 0.36 m<sup>3</sup>/s とした。

### b) 単位期間, 単位量

動的計画法では、貯水量や放流量、計算対象期間などの諸量は単位量、単位期間を用いて離散化して計算を行っている。本研究では計算機の記憶容量と最適化目的が利水操作であることを考慮して単位期間を5日で1単位、単位量を5日間の平均流量が1.0m<sup>3</sup>/sである場合を1単位量とした。よって1単位量 = 432,000 m<sup>3</sup>となる。

### c) 計算条件

計算を行うために前節で設定した制約条件を表-1に示す。豊平峡ダムでは利水最大貯水量は洪水期と非洪水期によって異なり、定山溪ダムでは利水最低貯水量を発電最低水量に設定した。最大放流量は流入量が利水最大放流量より小さい場合は利水最大放流量に設定し、その逆の流入量が利水最大放流量より大きい場合は洪水調節開始流量の 60 m<sup>3</sup>/s を上限として流入量分を放流できるように設定した。また、石山地点での流量の下限値として水道用水の実績取水量の年平均値 5.16m<sup>3</sup>/s (2005, 2006 年) と 1/10 濁水流量の 0.36 m<sup>3</sup>/s の合計値は下回らないように条件を設定した。

初期条件と単位期間の最終条件として与えるダムの貯水量は簡易モデルで求めたダム貯水量の1月1日の値を現況、将来それぞれの値を設定して計算を行った。

## 5. 計算結果と分析

### (1) ダム単体操作の結果と分析

まず、簡易モデルで求めたダム貯水量の推定結果と同条件の DP 単体モデルでの推定結果を比較する。図-10 に豊平峡ダムの現況推定結果を、図-11 に豊平峡ダムの将来推定結果を示す。簡易モデルより求めた推定結果と計算の単位期間は異なるが、DP 単体モデルで求めた現況結果は全期間で利水放流を行うことができ、将来結果では6月中旬から8月中旬にかけて放流量0の日が出現しないように5月、6月の放流量を減らす傾向が見られ、それでも7月から9月にかけては貯水位が最低水位近くを推移する結果となり、簡易モデルで求めた結果と近い結果が得られた。定山溪ダムでも同様の傾向が見られ、単体でのダム操作では最適操作を行ったとしても将来的に利水へ支障をきたす可能性が示唆された。

### (2) ダム連携操作の結果と分析

#### a) 現況推定結果

単体でのダム操作での問題点を解決するために、ダムの連携操作による対応策を考えた。まず、DP 連携モデルでの現況の推定結果を示し、連携操作による最適操作に

表-1 両ダムの制約条件

	利水最大貯水量(m <sup>3</sup> )			利水最低貯水量(m <sup>3</sup> )	放流量(m <sup>3</sup> /s)	
	非洪水期 1/1～6/14, 11/1～12/31	第1期洪水期 7/1～9/30	第2期洪水期 6/15～6/30, 10/1～10/31		最小値	最大値
豊平峡ダム	37,100,000	16,900,000	29,000,000	0	0	26.4 (流入量<利水最大放流量) 流入量 (最大80m <sup>3</sup> /s)
定山溪ダム			59,600,000	11,200,000	0	10.0 (流入量 (最大80m <sup>3</sup> /s))

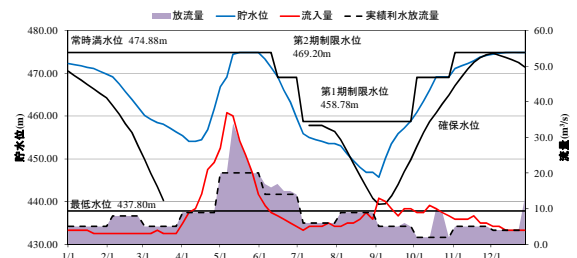


図-10 豊平峡ダム現況の DP 単体モデルの推定結果

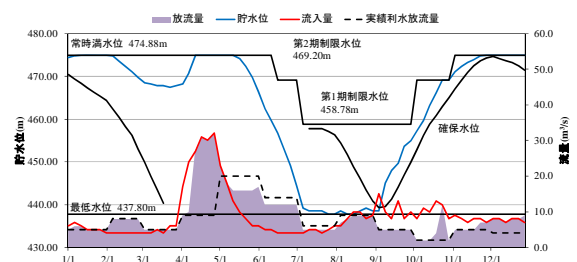


図-11 豊平峡ダム将来の DP 単体モデルの推定結果

ついて検討した。図-12 に豊平峡ダム、図-13 に定山溪ダムの DP 連携モデルによる現況推定結果をそれぞれ示す。結果より簡易モデルに比べて、豊平峡ダムの2月から4月や定山溪ダムの1月から3月など利水需要量より多く放流している期間があり、これは下流の需要量を満たすために放流を多くしているためである。また、流入量が多くなる融雪期を前にダム貯水位を最低水位近くまで下げて、なるべく洪水調節をしないような操作を行っている。以上より、連携操作では両ダムの状況を見ながら下流の需要を満たす放流が可能である結果となった。

#### b) 将来推定結果

次に、DP 連携モデルによる将来の推定結果を示し、将来の水不足に対する対応策としての連携操作の有用性を検討した。図-14 に豊平峡ダム、図-15 に定山溪ダムの DP 連携モデルによる将来推定結果をそれぞれ示す。DP 単体モデルの結果と比較して、豊平峡ダムでは5月、6月の利水放流量を減らすことで貯水位をなるべく高い状態を維持し、7月から9月までの貯水位が大きく低下することはなく、放流を行うことができている。また、豊平峡ダムからの放流が減る分は定山溪ダムからの放流を増やすことで補っており、ダムの連携操作によって下流の水需要を満たしつつ、ダムの貯水量が不足するような状態を回避することが可能であることを示した。

## 6. まとめ

本報告で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 気象庁・気象研究所の地域気候モデル (RCM20) の温

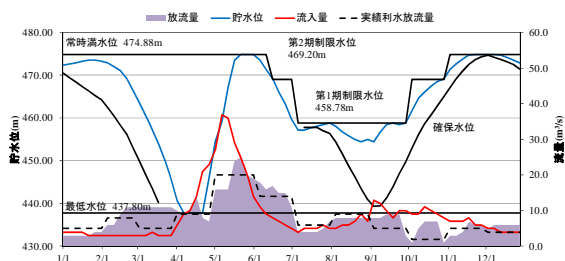


図-12 豊平峡ダム現況のDP連携モデルの推定結果

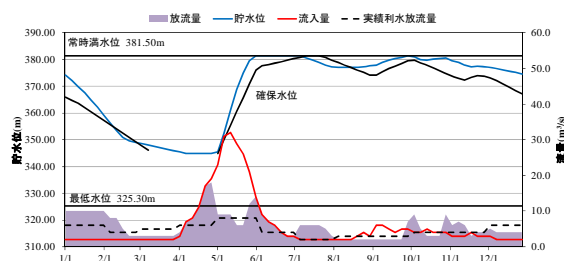


図-13 定山溪ダム現況のDP連携モデルの推定結果

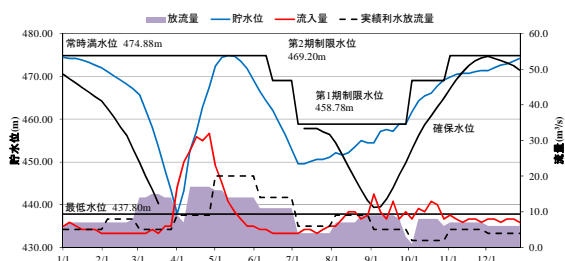


図-14 豊平峡ダム将来のDP連携モデルの推定結果

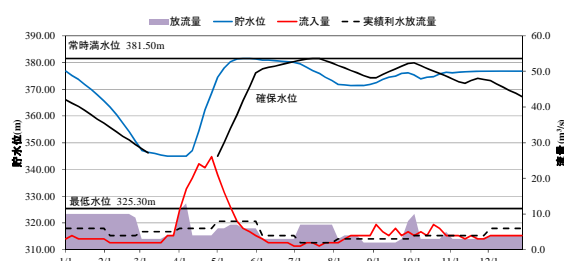


図-15 定山溪ダム将来のDP連携モデルの推定結果

暖化予測実験結果のバイアス補正したデータを用いて現況と将来の水循環計算を行い、将来的な流出量の変化を推定した。

- 2) 現況と将来の平均的なダム貯水位と放流量を推定し、豊平峡ダムでは6月中旬から8月中旬に貯水位が大幅に低下し、利水放流を行えない日が出現し、利水への影響が懸念された。
- 3) 動的計画法を用いてダムの最適操作を検討し、ダムの単体操作で生じる水不足は、ダムの連携操作により回避可能であることを示した。

今後の課題として、実時間操作といった管理問題への展開を考え、流入量の不確実性を考慮できるように予測情報や確率DPの適用などを検討していきたい。

**謝辞：**本研究の一部は学術研究助成基金助成金基盤研究(C) (課題番号 23560602) と平成 22 年度河川整備基金 (助成番号 22-1211-002) の助成を受けた。また、気象庁地球環境・海洋部気候情報課からは地域気候モデル(RCM20)の気候変化予測結果を提供いただいた。また、北海道開発局にはデータ提供等で協力いただいた。ここに記して謝意を示す。

**参考文献**

- 1) 川村一人, 中津川誠: 気候変動下における積雪地域の利水への影響を踏まえたダム管理のあり方について, 河川技術論文集, 第 17 巻, pp.287-292, 2011.
- 2) 臼谷友秀, 中津川誠: 北海道における冬期温暖化の傾向と水循環へ与える影響, 地球環境シンポジウム論文集, 13, pp.1-6, 2005.
- 3) 竹内邦良: 貯水量の累加損失係数を用いた貯水池群の最適操作手法, 土木学会論文報告集, 第 222 号, pp.93-103, 1974.
- 4) 高棹琢馬, 池淵周一, 小尻利治: 水量制御からみたダム

群のシステム設計に関する DP 論的研究, 土木学会論文報告集, 第 241 号, pp.39-50, 1975.

- 5) 佐山敬洋, 立川康人, 菅野浩樹, 寶馨: 分布型流出モデルと動的計画法の結合による貯水池制御最適化シミュレータの開発, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.547-552, 2010.
- 6) 野原大督, 坪井亜美, 堀智晴: 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, 京都大学防災研究所年報, 第 52 号 B, pp.753-764, 2009.
- 7) Lopez A, Fung F, New M, Watts G, Weston and A, Wilby R.L.: From climate model ensembles to climate change impacts and adaptation: A case study of water resource management in the southwest of England, Water Resources Research, 45, W08419, doi:10.1029/2008WR007499, 2009.
- 8) Rajee D, Mujumdar P.P.: Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change, Advances in Water Resources, 33, pp.312-326, 2010.
- 9) 気象庁, 地球温暖化予測情報第 6 巻 IPCC の SRES A2 シナリオを用いた地域気候モデルおよび都市気候モデルによる気候予測, 2005.
- 10) 口澤寿, 中津川誠: 熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散の推定, 北海道開発土木研究所月報, No.588, pp.19-38, 2002.
- 11) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 12) 藤原洋一, 大出真理子, 小尻利治, 友杉邦雄, 入江洋樹: 地球温暖化が利根川上流域の水資源に及ぼす影響評価, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.367-372, 2006.
- 13) Bellman R: Dynamic Programming, 340 pp., Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1957.
- 14) 池淵周一, 小尻利治, 宮川裕史: 中・長期気象予測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.

(2011. 9. 30 受付)