

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

RESEARCH ON DAM OPERATION CONSIDERING EFFECTS OF
CLIMATE CHANGE ON WATER USE IN A SNOWY REGION

川村一人¹・中津川誠²

Kazuto KAWAMURA, Makoto NAKATSUGAWA

¹ 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)

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

This paper investigates how to operate existing dams as an adaptation to climate change. In cold, snowy regions, climate change is causing temperatures to rise and snowfall to decrease. This is expected to shift the snow-melting season earlier, to decrease river discharge and, consequently, to influence water. We estimated future changes in hydrologic processes and average annual water levels for dams in the Toyohira River catchment area. Using reproductions (1981-2000) and future estimates (2081-2100) provided by the Regional Climate Model of the Japan Meteorological Agency (RCM20), we estimated the future hydrological cycle of the Toyohira River basin in order to estimate changes in water levels of statistically normal dams. The simulation shows that a reduction of snowmelt runoff will cause dam discharge to decrease, which may result in water supply shortages. However it also suggests that coordinating the discharge operations of two dams can effectively address those water shortages.

Key Words : *adaptation to climate change, snowy region, hydrologic processes, dam operation, coordination between two dams*

1. はじめに

北海道, 東北, 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になっている. 融雪期の流出状況は気象の影響を強く受け, 気候変動による気温上昇を考えたとき積雪の減少, 融雪期の早期化や融雪出水の減少が予想され, 水利用に影響を与えると懸念されている. その一方で, 局地的な豪雨の発生や夏期以外の大雨の増加によって治水安全度の低下も指摘されている¹⁾.

温暖化による気候変動が流域水資源に与える影響評価については多くの研究がなされている. 例えば, 藤原ら²⁾は気候モデル出力値と観測値の確率分布が一致するようにバイアス補正し, 利根川上流域の水資源に及ぼす影響を評価している. また, 立川ら³⁾は全球大気モデル(GCM)出力データを分布型流出モデルの入力として, 最上川・吉野川流域の河川流況への影響を分析している.

このように, 気候変動に対する影響評価は多くの研究がなされている一方で, 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ってくる. その具体例としてダム運用方法の改善

があるが, 利水と治水両面の安全度を上げるにはダム貯水池管理を流出状況に合わせて効率的に行う必要がある.

このような背景から, 本研究では, 気象庁・気象研究所から提供された MRI-RCM20(以降 RCM20)の再現結果(1981~2000年), 21世紀末予測値(2081~2100年)を用いて, 北海道内にある豊平川流域を対象に, 現在と100年後の流出状況の変化を推定し, それに対する適応策としてのダム運用方法について検討した. 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) RCM20の計算値に含まれるモデルバイアスを検出するために観測値と再現結果の比較補正を行った.
- 2) 補正したデータを用いて, 現況と将来の豊平川流域内の水文諸量を定量化し, 積雪深や流出量の変化を試算した.
- 3) 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, 将来的な水不足に対応できるダム運用を検討した.

以上により, 現況の放流操作では将来のダムの利水放流に支障をきたすことが示唆され, その適応策としてダムの連携による放流操作を提案した.

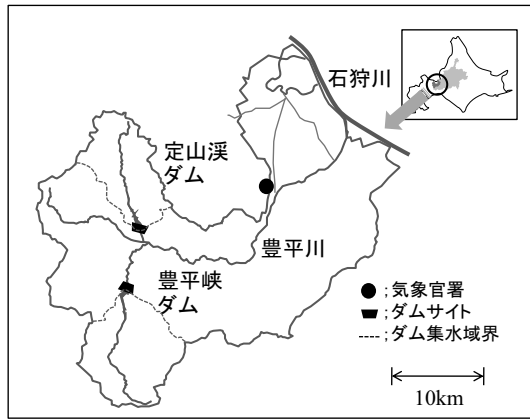


図-1 豊平川流域

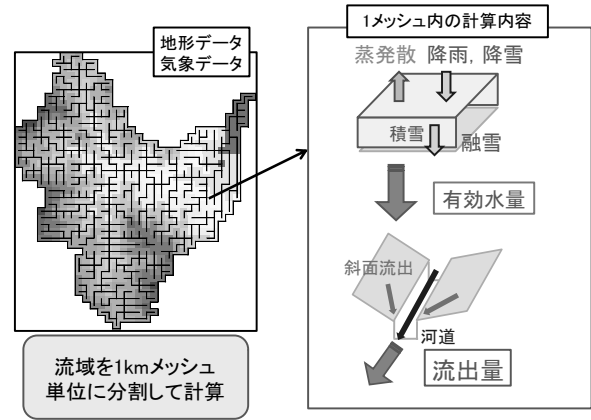


図-2 計算手法の概要

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 960km² 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 134km²) と定山溪ダム (流域面積 104km²) 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. 水循環の計算手法

流域内の水循環は口澤ら⁴⁾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、降雨量を水・熱収支計算より求める。同時に積雪深、積雪密度も計算する。最後に、蒸発散量、融雪量と降雨量より流出量を求めていく。以下に、各計算の概略を示す。

(1) 水・熱収支の計算

陸面の熱収支は近藤ら⁵⁾によって提案されている 2 層モデルに基づき、次式のように定式化した。

$$f_v R \downarrow + (1 - f_v) \sigma T_v^4 - Q_G + Q_R = \varepsilon \sigma T_g^4 + H_g + IE_g \quad (1)$$

$$(1 - f_v)(R \downarrow + \varepsilon \sigma T_g^4) = 2(1 - f_v) \sigma T_v^4 + H_v + I(E_v + I) \quad (2)$$

ここで、式(1)は地表面、式(2)は植被層の熱収支式である。また、 f_v は放射に対する透過率、 $R \downarrow$ は下向き正味放射量 (W/m²)、 Q_G は地表面に供給される熱フラックス (W/m²)、 Q_R は降雨によって供給される熱フラックス (W/m²)、 H_g 及び H_v は各々地表面および植被層からの顕熱フラックス (W/m²)、 IE_g および IE_v は各々地表面及び植被層からの潜熱フラックス (W/m²)、 I は植被層からの遮断蒸発に伴う潜熱フラックス (W/m²)、 T_g および T_v は各々地表面および植被層の代表温度 (K)、 σ は Stefan-Boltzmann 定数 (=5.67×10⁻⁸ W/m²/K⁴) である。

以上により、各層の代表温度の T_g および T_v を求め、

顕熱・潜熱フラックスをバルク法より求める。降水による遮断蒸発潜熱は、近藤ら⁵⁾の知見に基づき推定し、降雪も降雨と同様に遮断蒸発を推定する。

積雪のない状態の地表面に供給される熱フラックスは、解析の対象が日平均状態の場合には微小項となることから、本解析では $Q_G=0$ W/m² とした。一方、積雪がある場合、積雪面に供給される熱フラックスは、次式とした。

$$Q_G = Q_M + Q_B \quad (3)$$

ここで、 Q_M は積雪面の融雪に使われる熱量 (W/m²)、 Q_B は土壌から積雪面に供給される熱量 (W/m²) を表す。なお Q_B は、1mm/d の融雪に相当する熱量 (-3.86 W/m²) を与えた。

式(3)より Q_M が決まり、融雪量 M (mm/d) が求まる。融雪量 M は次式に示す。

$$M = 86,400 Q_M / \ell_f \quad (4)$$

ℓ_f は氷の融解潜熱 (=0.334×10⁶ J/kg) である。また積雪深と積雪密度は本山ら⁶⁾の粘性圧縮理論により求めた。

(2) 流出量の計算

流出量の計算は、入力値となる降雨量、融雪量、蒸発散量に対応させて、メッシュ単位で行う。一つのメッシュでは、上流側のメッシュからの流量を河道追跡し、また、メッシュ内で生じる流出を計算し、これらの合計をメッシュの流出量とした。河道追跡には kinematic wave 式を変形した次の式を用いた。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{5}{3} \frac{i^{0.3} Q^{0.4}}{n^{0.6} B^{0.4}} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

ここで、 Q は流量、 i は疑似河道の勾配、 n はマンニングの粗度係数、 B は川幅 (m) を表す。演算は秒単位の時間ステップで行い、1日 (86,400sec) 後の値を出力している。 i は石狩川流域ランドスケープ情報⁷⁾から計算対象メッシュとその流下側メッシュの最低標高との標高差から決定した。 n は全域で 0.05 とし、 B は山口ら⁸⁾の報告を参考に決定した。

メッシュ内での流出計算には、3 段タンクモデルを用いた。モデルパラメータは、豊平峡ダムで同定したパラメータ⁹⁾を全メッシュ同一の値で計算を行った。

4. メッシュデータの作成

(1) RCM20 の概要

RCM20 は気象庁・気象研究所により開発された水平解像度 20km の地域気候モデルである。計算内容は全球大気・海洋結合モデル (CGCM2) を境界条件として、1981～2000 年の 20 年間で再現したものである。さらに IPCC による経済重視で地域志向が強まると仮定した「SRES A2 シナリオ」に準拠して将来の気温や降水量の予測計算を行っている。本研究では RCM20 の出力結果のうち、気温、気圧、風速、比湿、雲量、降水量、降雪量を水循環計算のデータに使用した。期間は再現期間の 1981～2000 年と将来予測期間の 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誤差が含まれるため、気候モデル出力値を補正して解析を行った。補正手法については次節に示す。

(2) RCM20 のバイアス補正手法

バイアス補正手法に関しては様々な方法が検討されているが、今回は藤原ら⁹⁾が行ったバイアス補正手法を用いた。補正手法の概念を図-3 に示す。この補正手法は Dettinger *et al.*¹⁰⁾、Wood *et al.*¹¹⁾の手法を改良した方法で、月平均気温や月降水量といった月単位で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である。また、それぞれの気象要素はある確率密度関数に従い、再現期間と将来予測期間において確率密度関数は時間的な変化はしないと仮定して補正を行っている。今回は、気温、降水量、降雪量、風速、湿度の 5 項目で補正を行った。なお、確率分布関数は正規分布とガンマ分布を用意し、標準最小二乗基準 (SLSC) によって適合度評価を行い、適合度の高いものを用いた。その結果を表-1 に示す。結果より観測値と RCM 出力値ほぼ同一の値が得られている。なお、SLSC の評価基準は 0.03 以下が目安とされている。今結果では評価基準を多少上回っているが今回は表中の確率分布を採用して補正を行った。補正值として気温は平均値の差を用い、他の要素は平均値の比を用いて補正を行った。比較する観測値としては 20 年間のデータがそろっている札幌地点を対象とした。

(3) 1km メッシュデータの作成方法

a) 気温

気温に関しては標高依存性を利用して、バイアス補正とダウンスケールを行った。手順を以下に示す。

- ① 札幌と RCM20 のデータをそれぞれ気温減率 (0.65°C/100m) で標高 0m の値に補正する。
- ② 前節のバイアス補正手法により誤差を補正する。
- ③ 1km メッシュの標高に気温減率で補正し 1km メッシュデータを作成する。

b) 気圧

RCM20 の気圧データを RCM20 メッシュと 1km メッシュ

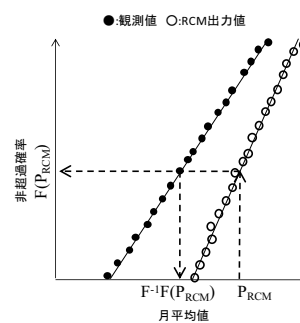


図-3 バイアス補正方法の概念図

表-1 採用確率密度関数の SLSC

	気温	降水量	降雪量	風速	湿度
確率密度関数	正規分布	ガンマ分布	ガンマ分布	正規分布	正規分布
観測値	0.051	0.043	0.045	0.047	0.053
RCM出力値	0.047	0.041	0.045	0.043	0.047

の標高差により減率 0.114hPa/m をかけて補正を行う。

c) 湿度

RCM20 には湿度データがないので、気温・気圧・比湿を利用して湿度データを作成した。作成した湿度データを札幌の観測値と比較してバイアス補正を行い、メッシュデータを作成した。

d) 風速

RCM20 には風速東西成分と南北成分があるので、それを合成したのち、札幌の観測値と比較してバイアスを補正し、補正した値を全メッシュに与えて使用した。

e) 日射量

日射量は快晴日の全天日射量の日平均値⁵⁾を推定し、それを RCM20 データの雲量を用いて減衰させた値を使用した。雲量は全メッシュ同じ値を与えた。

f) 降水量

降水量は流域内での分布を考慮するために、緯度と標高を加味する補正を行った。手順を以下に示す。

- ① 札幌と RCM20 の降水量を比較し、前節のバイアス補正手法により誤差を補正する。
- ② 1998～2001 年の 5～10 月の流域内の降雨量観測値を使用して、札幌と各観測点の総降雨量比を目的変数、札幌と各観測点の緯度差と標高比を説明変数とした回帰式を作成する。
- ③ ②で作成した総降雨量の比率を求める式に、RCM20 の補正した値をかけて降水量データを作成する。

$$R = R_1 \times [(y_i - y) \times a_1 + (z_i / z) \times a_2 + a_3] \quad (6)$$

ここで R は任意メッシュの降水量 (mm)、 R_1 は RCM20 の補正後の降水量 (mm)、 y_i 、 z_i はそれぞれ任意メッシュの緯度、標高、 y 、 z はそれぞれ札幌観測点の緯度、標高、 a_1 、 a_2 、 a_3 は回帰係数である。

g) 降雪量

降雪量も流域内での分布を考慮するために、緯度と標高を加味する補正を行った。手順を以下に示す。

- ① 札幌と RCM20 の降雪量を比較し、前節のバイアス補正手法により誤差を補正する。

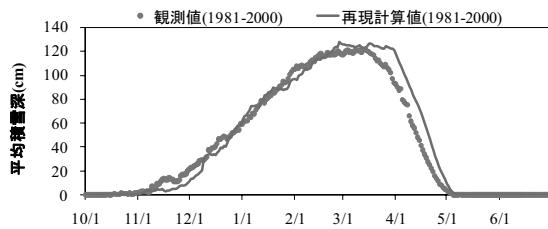


図-4 豊平峡ダム(ダムサイト)の積雪深比較

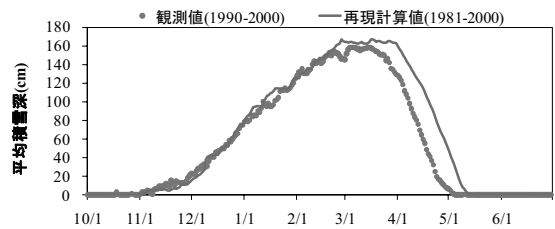


図-5 定山溪ダム(ダムサイト)の積雪深比較

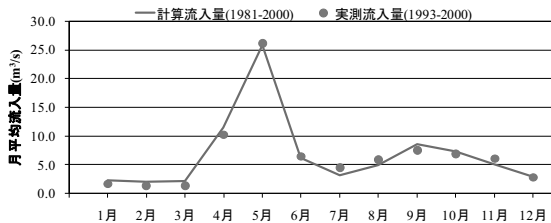


図-6 豊平峡ダムの流入量比較

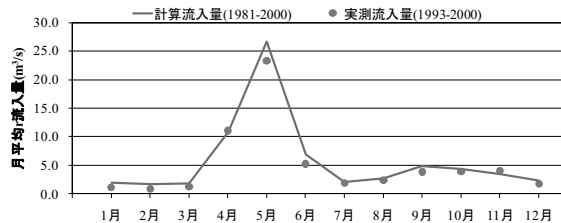


図-7 定山溪ダムの流入量比較

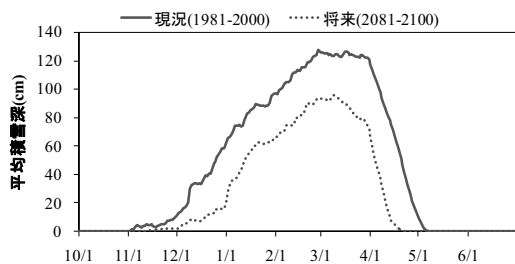


図-8 豊平峡ダムの積雪深の将来比較

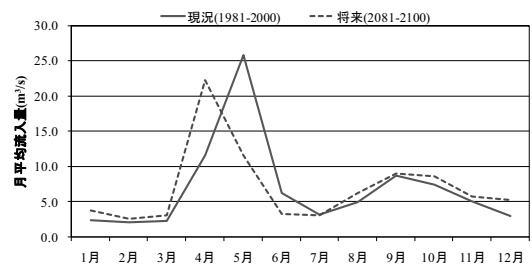


図-9 豊平峡ダムの流入量の将来比較

- ② 1996～2001年の11～4月の流域内の積雪深観測値を使用して、札幌と各観測点の累積降雪深比を目的変数、札幌と各観測点の緯度差と標高比を説明変数とした回帰式を作成する。
- ③ ②で作成した累積降雪深の比率を求める式に、RCM20の補正した値をかけて降雪量データを作成する。

$$S = S_1 \times [(y_i - y) \times b_1 + (z_i / z) \times b_2 + b_3] \quad (7)$$

ここで S は任意メッシュの降雪量(mm), S_1 はRCM20の補正後の降雪量(mm), y_i , z_i はそれぞれ任意メッシュの緯度, 標高, y , z はそれぞれ札幌観測点の緯度, 標高, b_1, b_2, b_3 は回帰係数である。

なお、水循環計算では相対湿度を用いた雨雪判別式⁵⁾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ている。

5. 計算結果と分析

(1) RCM20 データによる再現計算と実測値との比較

RCM20 の出力値から作成したデータを用いて水文諸量を再現計算し、実測値との比較からバイアス補正とダウンスケールの妥当性を考える。なお、本章において、観測値と計算値の年数が一致しない要因は気候モデルの出力年の値が実際の観測年の値を厳密に再現しているわけではないこと、観測結果が20年分得られなかったためである。まずは、豊平峡ダムと定山溪ダムの各ダムサイトにおける積雪深を比較する。図-4に豊平峡ダムの1981

～2000年の20年平均積雪深を、図-5に定山溪ダムの1990～2000年の観測データの11年間の平均値と再現計算結果の20年平均値の比較を示す。図を見ると、バイアス補正したRCM20データを用いた計算結果は積雪深の増減や積雪の消失日ともに再現できていることがわかる。

次に、ダム流入量について比較する。図-6に豊平峡ダムの月平均流入量の比較、図-7に定山溪ダムの月平均流入量の比較を示す。観測値は、定山溪ダム完成後の1993～2000年の8年間の平均値を計算結果は20年間の平均値を表している。図を見ると、定山溪ダムの5月の流入量はやや過大であるが、積雪地域特有の融雪期に流量が増加するといった傾向を概ね再現できる結果となった。

(2) 将来予測計算結果の分析

RCM20の出力値による現況再現期間と将来予測期間の水循環計算の結果を比較し、水資源に与える影響について分析する。まず、図-8に豊平峡ダムの現況再現期間と将来予測期間の積雪深の20年平均値を示す。図より、現況に比べて将来の最深積雪深は約30cm減少している。また、積雪消失時期も現況は5月の上旬であるのに対して、将来は4月の中旬頃に早まっていることが分かる。

次に、図-9に豊平峡ダムの再現期間と将来予測期間の流入量の20年平均値を示す。図より、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月の流入量は半分以下に減少し、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の流入量も増加する結果となった。定山溪ダムでも同様の傾向が見られた。

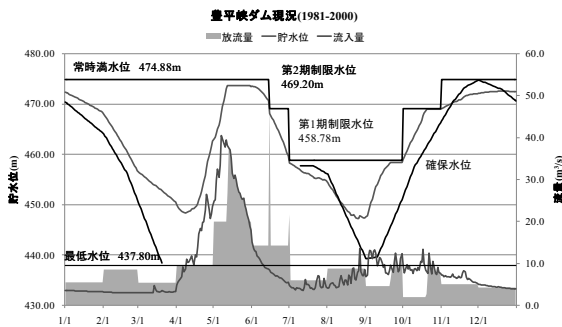


図-10 豊平峡ダム現況再現の貯水位推定結果

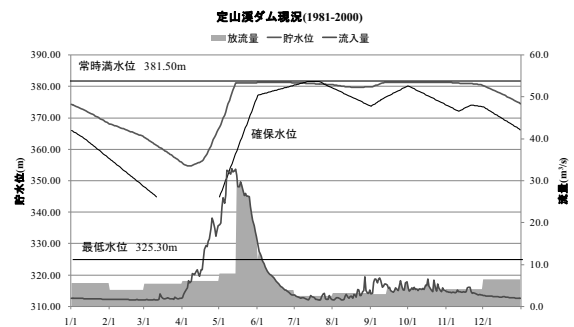


図-12 定山溪ダム現況再現の貯水位推定結果

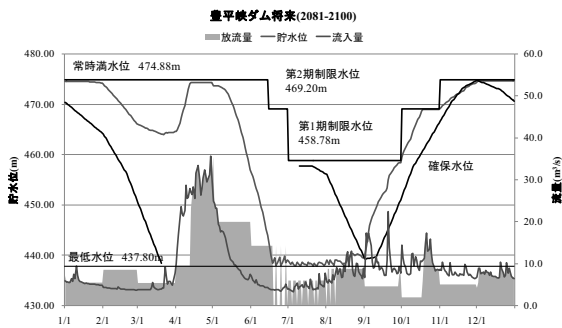


図-11 豊平峡ダム将来予測の貯水位推定結果

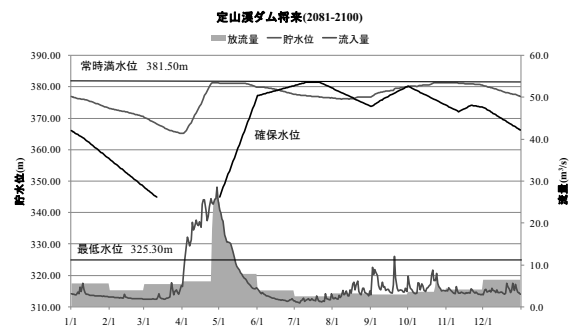


図-13 定山溪ダム将来予測の貯水位推定結果

6. ダム運用方法の検討

(1) ダム貯水池運用のモデル化

前章で示した流入量の変化が豊平河流域内のダム運用に与える影響について検証するために、ダム貯水池運用をモデルにより推算した。

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。以下にダム貯水池運用のモデル化の手順を示す。

a) ダムの貯水域とダム流入量の決定

ダムの貯水域は貯水位に応じて変動するが、本研究で用いる水循環モデルのメッシュは1kmメッシュであり、ダムの貯水域を正確に表現することは難しい。そこで本研究では、ダム堤体のあるメッシュをダム貯水池メッシュとし、流出計算過程においてダム貯水池メッシュへの流入量をダム流入量とした。また、豊平峡ダムは他流域(薄別川)からの発電用導水が行われており、それを加味するために発電用導水の実測値の月平均値を豊平峡ダムの計算流入量に加算した。

b) ダム放流量の決定

ダム貯水池には操作規則が設定されており、操作規則に則って放流操作が行われている。豊平峡ダムと定山溪ダムはともに治水・利水を目的とした多目的ダムで、洪水調節、発電放流、水道用水などの用途で放流が行われていて、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。とくに利水に関わる放流操作は人為的な判断によって左右される部分が大きく、放流量の決定を厳格にルール化するのは難しい。そこで本研究では現

況と将来のダム貯水池運用の傾向を見るために、20年間の平均値を用いたダム操作を考えてみた。ダム操作は各期間20年間の日平均流入量を入力条件とし、両ダムの1993～2007年の15年間の実績利水放流量の月平均値($\text{m}^3/\text{日}$)を放流量として与えて、この際に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。また放流によって貯水位が最低水位になる場合は放流量を0とした。なお、ダム下流での水道と水力発電の水利権量は最大で $7.92\text{m}^3/\text{s}$ 、 $15.6\text{m}^3/\text{s}$ となっていて、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。

(2) ダム貯水池運用の計算結果

前節で示したダム貯水池運用モデルを用いて、両ダムの貯水位と放流量の推定を行った。図-10に豊平峡ダムの現況結果、図-11に豊平峡ダムの将来予測結果、図-12に定山溪ダムの現況結果、図-13に定山溪ダムの将来予測結果を示す。両ダムともに現況結果では全期間で利水放流量分の放流操作を行うことができ、5～6月にかけて洪水調節が行われる結果となった。一方、将来予測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減少し、6月中旬から8月中旬にかけて利水放流が行えない日が出現することがわかる。また、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。ま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月中旬にかけて水道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る結果となった。

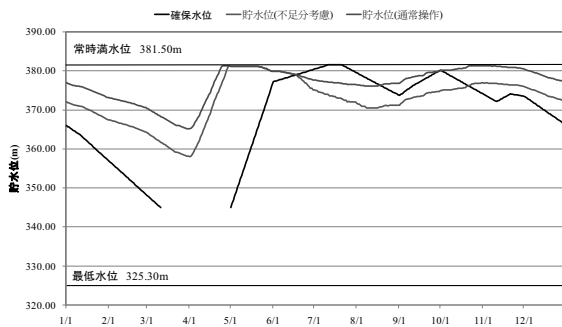


図-14 豊平峡ダムの不足分を定山溪ダムで放流した場合の定山溪ダムの貯水位推定結果

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。

(3) 将来のダム運用方法の検討

前節で示した将来のダム運用の問題点を解決するために、本研究では2つのダムの連携による対応策を検討した。今回は豊平峡ダムで利水放流ができない場合に定山溪ダムで不足分を放流することができるか検討を行った。その結果を図-14に示す。通常の放流操作と比較して、不足分を放流した場合は6月から貯水位が減少し8月中旬には約5.5m水位が低下している。ただし、最低水位までには十分な余裕があり、不足分を放流しても定山溪ダムからの放流によって補うことができる結果となった。

しかし、今回は下流の水道用水の取水に影響が出ない量の放流しかできておらず、下流の水力発電への影響が懸念される。また、不足分は補うことができたが、その期間は豊平峡ダムでの発電放流が行えないといった問題が考えられるので、流出状況の変化に合わせて放流量を決定する必要がある。

なお、今回のダム運用方法の検討では平均流入量の場合しか考慮しておらず、また将来的な水需要の変化を考慮しない結果であるため、今後は流入量の変動や水需要の変化を考慮した考察を行っていく必要がある。

また、将来の冬期間のダム貯水位は現況に比べて増加しているため、発電放流量の増加が可能であることが示唆された。

7. 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)の出力結果のバイアス補正を行い、そのデータを用いて流域水循環の計算を行い、積雪深や流量をうまく再現することができた。
- 2) 将来予測計算を行い、積雪深の減少や融雪期の早期化、融雪出水の減少により、5月の流出量が大きく減少し、融雪のピークが4月に早まった。
- 3) 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た。

- 4) 豊平峡ダムからの放流量の不足分は定山溪ダムの放流によって補えることができた。また、冬期間の発電放流量の増加の可能性が示唆された。

以上のような積雪地域の水不足へのリスクを回避し、適応していくために、現在の水利用の実態をより正確に把握し、ダム運用を効率的に行っていく方策を検討していくことが望ましい。

謝辞：本研究の一部は平成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、北海道開発局札幌開発建設部計画課からは豊平川の利水関係、同部豊平川ダム統合管理事務所からはダム関係の情報を提供いただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 白谷友秀, 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.
- 2) 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.
- 3) 立川康人, 滝野晶平, 市川温, 椎葉充晴: 地球温暖化が最上川・吉野川流域の河川流況に及ぼす影響について, 水工学論文集, 第53巻, pp.475-480, 2009.
- 4) 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.
- 5) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 6) 本山秀明, 小島賢治: 積雪深変化の推定(乾雪の場合), 低温科学, 物理編, 44, pp.15-25, 1985.
- 7) 財団法人 北海道河川防災研究センター, 石狩川流域ランドスケープ情報, 1998.
- 8) 山口甲, 新庄興, 三田村一弘, 上野順也: 豊平川の生産土砂量について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第55号, pp.268-271, 1999.
- 9) 中津川誠, 濱原能成, 星清: 積雪変化を考慮した長期流出計算, 水工学論文集, 第47巻, pp.157-162, 2003.
- 10) Dettinger, M.D., Cayan, D.R., Meyer, M.K., and Jeton, A.E.: Simulated hydrologic responses to climate variations and change in the Merced, Carson, and American River basins, Sierra Nevada, California, 1900-2099, Climate Change, 62, pp.283-317, 2004.
- 11) Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V. and Lettenmaier, D.P.: Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, Climate Change, 62, pp.189-216, 2004.

(2011. 5. 19 受付)