

気温変化を考慮したダム流域水循環の感度分析

Sensitivity Analysis of Hydrologic Process in Dam Basins Due to Temperature Change

(株) ドーコン 河川部 ○正会員 工藤 啓介 (Keisuke Kudo)

(独) 北海道開発土木研究所 環境研究室 正会員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

現在、地球が温暖化しつつあることは、IPCC レポート¹⁾等によって報告されており、地球規模の温暖化により降水特性や融雪特性等が変化することで、水資源賦存量の変化や洪水被害の頻発を引き起こす可能性がある。しかし、現在の治水・利水計画には気候変化による影響は見込まれていない。気候変化の影響を河川管理に反映させるためには、流域規模での水循環の変化とそれに伴う洪水流出や水資源の変化を予測する必要がある。

そこで本研究では、気温変化に伴う水収支の変化を把握するため、100km²程度のダム流域を対象として水・熱収支モデルを用いた蒸発散量、積雪量、融雪量の感度分析を実施した。さらに、タンクモデルにより流出計算を実施し、気温変化に伴うダム貯水池運用の変化を推定した。

2. 研究対象の概要

今回の研究対象としたのは、北海道の一級河川豊平川上流部の定山溪ダム流域(104km²)及び豊平峡ダム流域(134km²)の2流域である。両ダムともに洪水調節(治水)及び発電、水道への利水を目的とした多目的ダムであり、国土交通省北海道開発局が管理している。流域の土地利用としては常緑針葉樹が大半で、落葉樹が少ない積雪寒冷地特有の森林形成となっている。また、標高は最も高い箇所約1200m、ダム湖周辺で約500~600mと全般的に高い。

流域内のダム管理所及びテレメータ観測所において、気象・水文観測を毎正時に実施しており、今回の研究では、基本的にダム管理用のルーチンデータ(降水量、風速、気温、湿度、日照時間、日射量、積雪深、貯水位、流入量、放流量)を使用した。

3. 気温・積雪量・流出高の経年変化

最初に、1996~2001年の定山溪ダム管理所(標高393m)における月平均気温の変化を図-1に示すが、概ね約-10~20°Cの間を推移しており、豊平峡ダム管理所(標高760m)についても同様の傾向となっている。なお、1998年はそれを除く5カ年の平均値に比べ、融雪期の4月で約3°C高く、逆に夏期の6~7月で約2°C低くなっていた。

次に、定山溪ダム観測所における積雪量(日最大積雪深)の変化を図-2に示す。2~3月に積雪深のピークを迎え、気温が上昇してくる4~5月に消雪している。1998年は他年の約2/3程度の積雪深であり、消雪の時期も3週間ほど早かった。

最後に、定山溪ダム流域の月別流出高の変化を図-3に

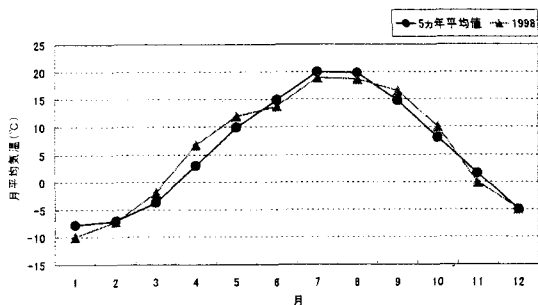


図-1 月平均気温の推移 (定山溪ダム管理所)

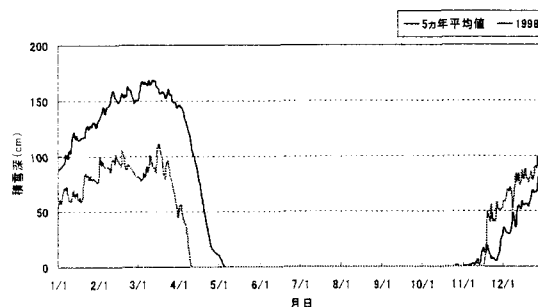


図-2 日最深積雪深の変化 (定山溪ダム管理所)

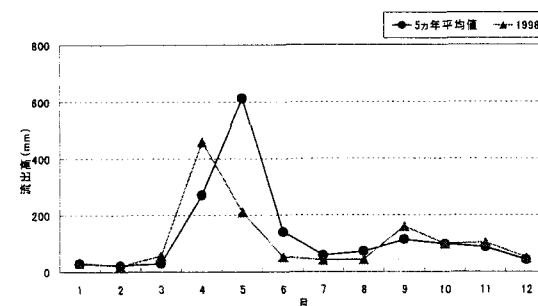


図-3 月別流出高の推移 (定山溪ダム流域)

示す。融雪出水期の4~5月と夏期出水期の8~9月に流出高が増加している。1998年は他年と異なり、融雪期の流出ピークが4月に現れ、5~6月には流出高が減少していた。以上より、1998年の積雪・融雪特性は明らかに他年と異なっており、融雪期における気温上昇に起因していると考えられる。IPCC レポート¹⁾によれば、CO₂の増加による地球全体の気温上昇量は、将来的に平均で約1.3~4.5°Cの範囲になるとしており、地球温暖化による気温上昇に伴い、今後1998年のような少雪・早消雪となることも考えられる。

4. 積雪深・積雪領域の再現検証

ダム流域の水循環に関する研究は、今まで中津川ら²⁾や口澤ら³⁾により、水・熱収支モデル(2層モデル)を用いた蒸発散量、積雪量、融雪量の推定及び流域水収支の評

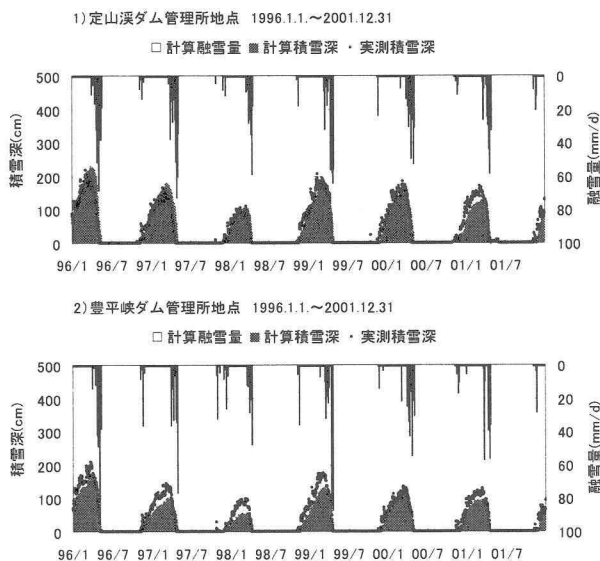


図-4 長期水・熱収支モデルによる積雪深の推定結果

値がなされており、妥当な結果が得られている。

本研究は、これまで確立された水・熱収支モデルを用いて蒸発散量、積雪量、融雪量の感度分析を行うこととした。最初に水・熱収支モデルの再現性確認を目的として、解析対象年数の追加、計算単位(メッシュ)の変更、流域地形の傾斜補正等を行い、積雪量の再現検証を実施した。なお、解析対象年数を1996年～2001年の6カ年とし、計算単位を約250m×250mメッシュとした。

両ダム管理所地点における積雪量の再現結果を図-4に示す。6カ年の長期にわたる積雪深、消雪のタイミングなど妥当に推定されており、既存研究同様モデルがほぼ妥当な結果を与えているといえる。

また、1998年と2001年の融雪期について、水・熱収支モデルから求められた積雪領域と衛星画像から抽出された積雪領域の比較検証を実施した。衛星画像については、積雪領域を詳細に把握でき、かつ水・熱収支モデルによる積雪領域と同程度の解像度を持つ衛星を対象として、SPOT(画像解像度30m:センサーlevel2を使用)及びLANDSAT(画像解像度80m:センサーTMを使用)を採用した。

図-5に、2002/5/2における水・熱収支モデルによる積雪領域と、宇宙開発事業団鳩山地球観測センターより入手した同時点の衛星画像(LANDSAT-TM)から抽出された積雪領域を示す。LANDSAT画像を用いた積雪領域は、LANDSAT画像のBANDから、BAND3-BAND4>0かつBAND4-BAND5>0(ここで、BAND3は0.63μm～0.69μm、BAND4は0.76μm～0.90μm、BAND5は1.55μm～1.75μm)という条件から判別した。図-5、図-6から、水・熱収支モデルにより積雪領域もほぼ妥当に再現されているとみなせる。したがって、長期モデルが与える任意個所の積雪深のみならず流域全体の積雪量についても妥当に定量化できていることが確認された。

5. 水・熱収支モデルによる感度分析

次に、気候変化があった場合の水循環の応答を感度分析的に調べてみる。表-1に、両ダム管理所で観測されて

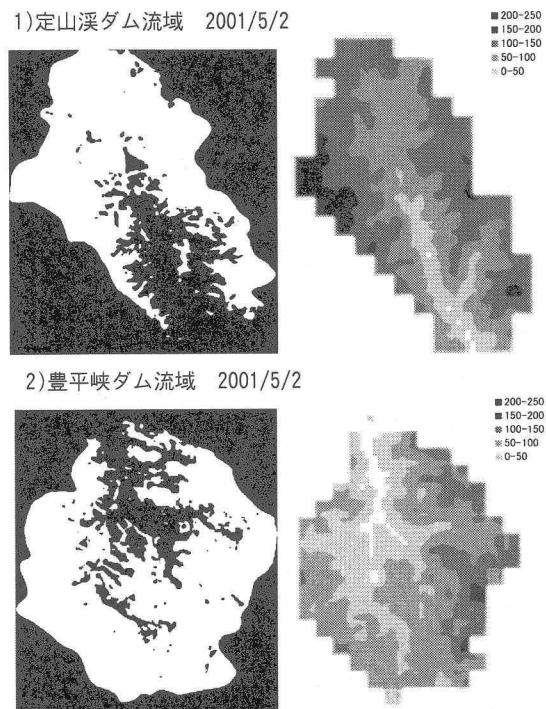


図-5 水・熱収支モデルによる積雪深の推定結果

いる気温データと他の気象データ(降水量、風速、湿度、日照時間、日射量)との相関分析結果を示す。感度分析を実施する際、気象データは重要なパラメータとなるが、両ダムとも気温と他の気象データとの強い相関は見られない。そこで、まずは感度分析の条件設定は気温のみを対象とすることとした。

また IPCC レポート¹⁾で、大気-海洋大循環モデル(AOGCM)等様々なモデルでCO₂の増加による地球全体の気温上昇量を算出しており、将来的に平均で約1.3～4.5℃の範囲になるとしていることから、水・熱収支モデルを用いた感度分析に用いる気温条件としては、両ダム観測所で観測されている気温データをベースとして、①現況(観測値をそのまま使用)、②観測値+3℃(IPCCレポート¹⁾の気温上昇量範囲の平均)、③観測値+5℃(IPCCレポート¹⁾の気温上昇量範囲の最大値程度)の3ケースとした。なお、一般的に地球温暖化による気温上昇により、植生分布が変化すると考えられているが、変化予測が困難であることから、植生条件は無視(現況のまま)とすることとした。前項で設定した気温条件3ケースについて、1996年～2001年の6カ年を解析対象年数として、両ダム流域の積雪水量(積雪深×積雪密度)、融雪量、蒸発散量について感度分析を行った。

表-1 気温と他気象項目の相関係数

項目	定山溪ダム	豊平峡ダム
降水量	0.014	0.075
風速	0.010	0.204
湿度	0.069	0.193
日照時間	0.259	—※
日射量	0.533	—※

※豊平峡ダムでは日照時間、日射量の観測は実施していない

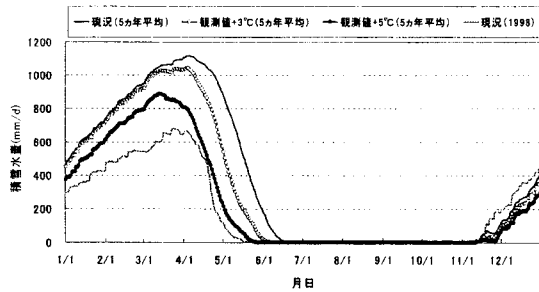


図-6 感度分析結果(定山溪ダム流域:積雪水量)

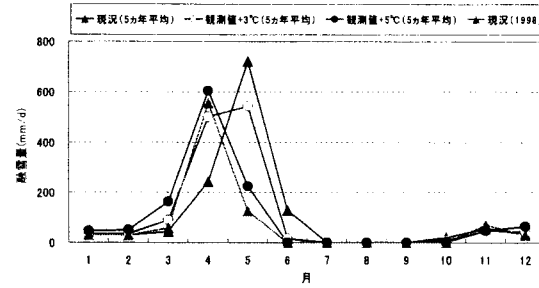


図-7 感度分析結果(定山溪ダム流域:融雪量)

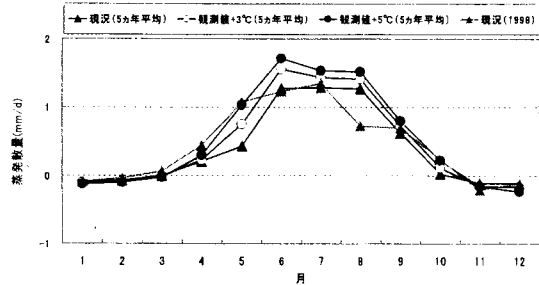


図-8 感度分析結果(定山溪ダム流域:蒸発散量)

表-2 感度分析結果(蒸発散量:1996~2001年平均)

気温条件	定山溪ダム流域		豊平峡ダム流域	
	蒸発散量	蒸発散変化量	蒸発散量	蒸発散変化量
現況(想定)	495	—	566	—
観測値+3°C	562	67	655	89
観測値+5°C	619	124	719	153

単位:mm

表-3 感度分析結果(消雪日)

1) 定山溪ダム流域

気温条件	1996	1997	1998	1999	2000	2001
観測値	6/22 (0)	6/22 (0)	5/25 (0)	6/16 (0)	6/13 (0)	6/7 (0)
観測値+3°C	6/8 (14)	6/11 (11)	5/15 (10)	6/6 (10)	5/31 (13)	5/29 (9)
観測値+5°C	5/28 (25)	5/27 (26)	5/2 (23)	5/26 (21)	5/25 (19)	5/19 (19)

2) 豊平峡ダム流域

気温条件	1996	1997	1998	1999	2000	2001
観測値	6/22 (0)	6/14 (0)	5/16 (0)	6/10 (0)	6/5 (0)	5/31 (0)
観測値+3°C	6/8 (14)	5/29 (16)	4/29 (17)	5/26 (15)	5/24 (12)	5/19 (12)
観測値+5°C	5/29 (24)	5/16 (29)	4/22 (24)	5/12 (28)	5/13 (23)	5/13 (18)

注) カッコ内の数字は現況と比べ消雪日の早まる日数を表す。

定山溪ダム流域の感度分析結果及び融雪期に暖かかった1998年を1998年を除く5カ年の平均(現況想定と考える)と比較し、図-6~図-8に示す。気温上昇に伴い積雪水量が減少し、融雪量、蒸発散量が増大しているのがわかる。また、積雪水量が0となる時期及び融雪量がピークとなる時期が、気温上昇により早まっているのがわか

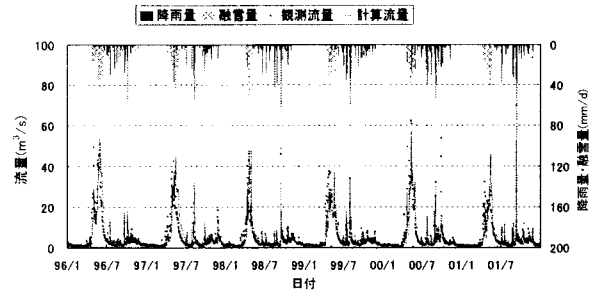


図-9 3段タンクモデルによる流出再現結果(豊平峡ダム流域)

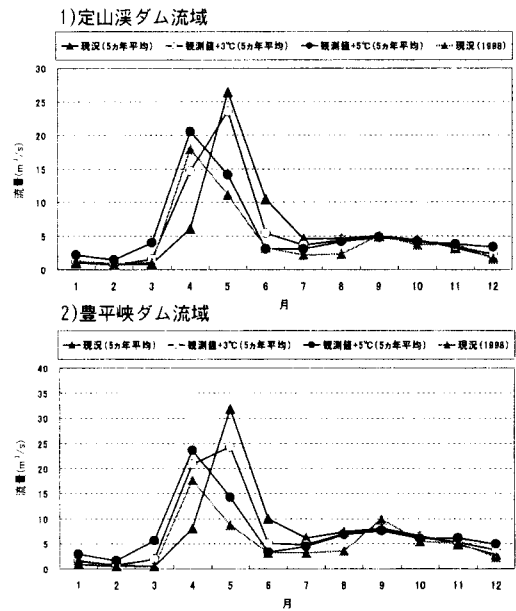


図-10 月平均流量の推移

る。また、表-2に感度分析で求められた両ダム流域の気温条件別蒸発散量の年平均値(1996~2001年)、表-3に両ダム流域内の消雪日(流域内から積雪が消滅する日)を示す。表-2より蒸発散量の変化量は全蒸発散量の約10~15%となることが示されている。また、表-3より、現況での感度分析結果に比べ、観測値+3°Cの条件で約2週間、観測値+5°Cの条件で約1ヶ月程度消雪日が早まるという結果となった。

6. ダム貯水池運用の予測

ダム貯水池運用の予測に際し、流出モデルによる流出量の推定を行った。流出モデルとしては、貯留効果をうまく表現しながら流出を推算できる3段タンクモデルを採用し、パラメータについてはNewton-Raphson法に基づく数学的最適化手法⁴⁾によって、両ダム流域とも1998年8月~10月の3ヶ月間(92日)の降雨期間のみのデータを用いて、中津川ら²⁾が同定した値を採用した

ダム流域からの流出量の再現検証については、すでに中津川ら²⁾によって行われているが、今回新たに行った水・熱収支モデルの計算結果を用いて、解析対象年数1996~2001年の6カ年として流量の再現検証を実施した。定山溪ダム流域の再現結果を図-9に示す。融雪出水期を含む長期間の流出がうまく再現されており、既存研究同様モデルがほぼ妥当な結果を与えているといえる。

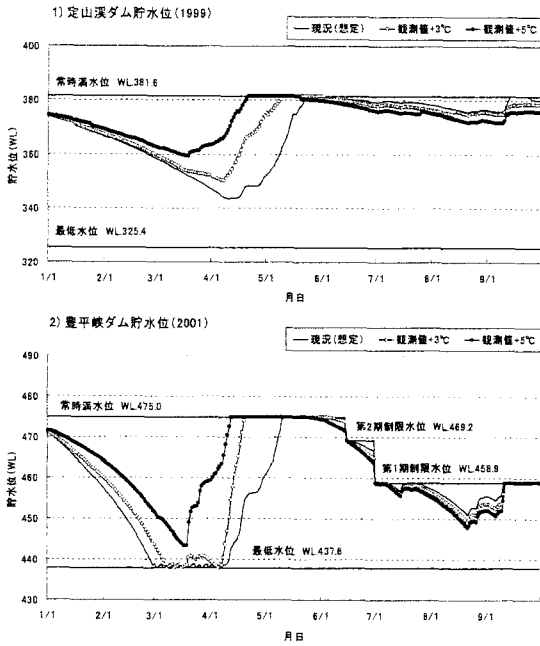


図-11 ダム貯水位推定結果

3段タンクモデルにより算出した定山溪ダム流域の流出量をもとに、月平均流量として整理し、図-10に示す。1998年は他の5カ年より融雪出水期の流出ピークが1ヶ月程度早まっており、融雪出水期における気温上昇が流出時期を早めていることがわかる。次に、1996～2001年の6カ年について、感度分析及び3段タンクモデルで得られた流出量等から、放流量を仮定しダム貯水位の変動を推定した。図-11に両ダム貯水位の推定結果を示す。なお、貯水位の初期値として前年の12月31日の貯水位を、両ダムの6カ年における実績利水放流量の平均値を放流量として与え、この際、貯水位が常時満水位を超過する量に応じて洪水調節(放流)を行うものとした。なお、現況(想定)は利水放流量が微妙に異なるため、実績値とは異なる。

図-12に定山溪ダムにおける融雪出水期(3～6月)における月別洪水調節量の推移を示す。1998年を除く1996～2001年の5カ年の平均と1998年を比較しているが、いずれのケースでも洪水調節のピークは5月となってお

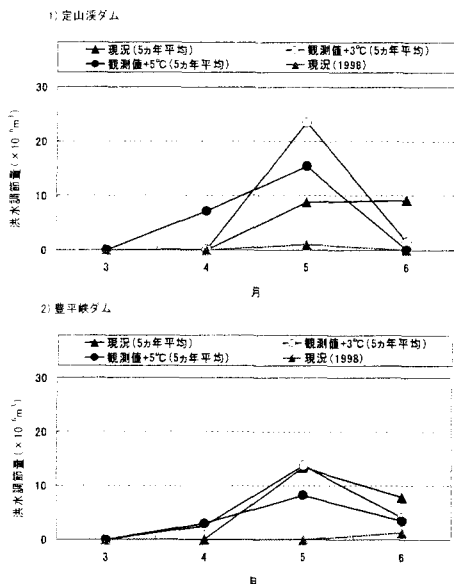


図-12 月別洪水調節量の推移

表-4 利水不足量の推移

月	定山溪ダム			豊平峡ダム		
	5カ年平均 (観測値+3°C)	5カ年平均 (観測値+5°C)	1998 (現況)	5カ年平均 (観測値+3°C)	5カ年平均 (観測値+5°C)	1998 (現況)
6	16.62	60.93	43.89	19.58	39.39	60.42

単位: $\times 10^6 \text{ m}^3$

表-5 流域水資源賦存量の推移
(1996～2001年平均)

年	気温条件	降雨量		蒸発散量 C	水資源賦存量 D=(A+B-C)
		A	B		
定山溪ダム流域	現況(想定)	822	1,240	495	1,566
	観測値+3°C	911	1,199	582	1,547
	観測値+5°C	999	1,098	619	1,478
豊平峡ダム流域	現況(想定)	1,046	1,076	566	1,556
	観測値+3°C	1,163	1,013	655	1,521
	観測値+5°C	1,249	943	719	1,473

単位: mm

り、気温上昇に伴い4月でも洪水調節が必要となるのがわかる。

また融雪出水期において、貯水位変動に伴い現況(想定)に対して不足する貯水容量(利水不足量)を、1998年を除く1996～2001年の5カ年の平均に対する差分量として整理し、表-4に示す。表-4より、現況(想定)に対して貯水容量が不足するのは融雪後期の6月で気温が上昇するに従い増大することがわかる。また、感度分析で推定された降雨量、融雪量、蒸発散量をもとに、両ダム流域の水資源賦存量の推移を整理し、表-5に示す。水資源賦存量は、気温上昇とともに蒸発散が増える分だけ減少する傾向にあると考えられる。

7. まとめ

本研究では、水・熱収支モデルによる感度分析を行い、気温上昇が流出に与える影響をした。この結果、雪が雨に変わり、融雪の始まるとともに洪水リスクが前倒しとなることが把握できた。また、蒸発散の増加により水資源が目減りすることも確認できた。今後検討対象を石狩川流域のような大流域に拡張し研究を行っていきたい。

謝辞: 本研究を行うにあたり、石狩川開発建設部豊平川ダム統合管理事務所、(株)GIS北海道に協力をいただいた。また、本研究は平成15年度日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C)、課題番号 14595006)ならびに平成15年度北海道開発局受託研究費の補助を受けて行ったものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) IPCC 編: IPCC 地球温暖化第三次レポート 気候変化 2001, 2002.
- 2) 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, 47, pp.157-162, 2003.
- 3) 口澤寿, 中津川誠: 熱・水環境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, 2002.
- 4) 渡辺和好, 館谷清, 松木賢治, 星清, タンクモデル定数の最適化手法の改良, 第33回水理講演会論文集, pp.55-60, 1989.