

# 融雪ピーク時期の簡易予測について

石狩川開発建設部 空知川河川事務所 野上 毅

2つの多目的ダムを有するS川流域を主対象に、各ダムの特徴を活かした統合管理を行っていく一助とするため、確保容量の貯留に重要な融雪ピーク流量発生時期の予測等に関する実用的研究を行った。まずマスカーブにより、近年の流況と渇水傾向の把握を行い、次に低標高流域の気象水文データにより、高標高流域の流入量等を簡易に予測できる方法について検討した。

## 1 はじめに

北海道の川では、年流出量の約半分は融雪によるものであるため、ダム管理者や発電事業者は、年毎の流況に応じ、放流量の適切な管理が必要となる。日本では1926年に物部長穂が発表した河川流量の調節に関する計画論が基本となり、「河川総合開発事業」が進められていく中で、池淵<sup>1)</sup>、竹内<sup>2)</sup>、小池<sup>3)</sup>、中津川<sup>4)</sup>など、数多くの水資源管理に関する研究が進められてきた。そのようなダム群の水資源管理の研究をカスタマイズして、現場技術者が理解した上で、実際の管理、運用へと実用化することは、難しい課題である。水資源管理において操作規則や利水ルールに基づいて、複雑な気象、水文の予測をリアルタイムに行っていく必要があることや、多すぎる水と少なすぎる水を均すという相対する目的の最適化や無駄の少ない水利用の追求のみならず、冗長性を持たせ、余裕の持った操作や運用も同時に追求する必要がある。

一般的にダムの水位運用は、既往流量実績や積雪量調査に基づき春先に計画が立てられる。しかし、積雪量が多くても融雪時期が早ければ、貯留するタイミングを逸することになり、一方、逆に貯留しすぎれば、発電に寄与しないダムのゲートからの放流や人件費増等の損失が発生する。そのため、気温等も含めた各種情報を総合し、リアルタイムに渇水傾向を予測していく必要がある。

## 2 対象流域の概要

S川流域（流域面積2618km<sup>2</sup>）には直列配置の2つの多目的ダムを有しており、下流部の穀倉地帯の治水や農業用水、水道、発電と各種水利用がされている。特にS川中流域に位置するTダムは、国内でも有数の流域面積を持つと共に、上流に利水として利用可能な最大容量がTダムの3倍以上のKダムを有するという特徴がある。両ダム連携した流水管理は流域の洪水調節や低水管理に貢

献をしている。また水利用の多くはTダム下流のS川低水管理基準点であるA地点直下から取水されるため、A地点を対象とした流量管理においてTダム下流の残流域の流量を考慮する必要があるが、本検討内では簡略化のため、省略した。

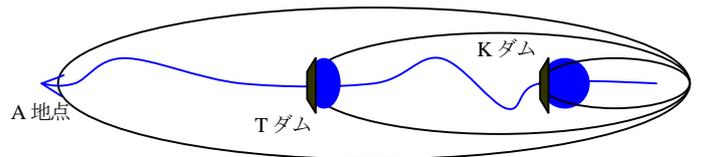


図-1 S川流域模式図

表-1 流域緒元

	流域面積	ダム容量 m <sup>3</sup> /s・d	最大発電 電流量	流域最大 標高	地点標 高	Kダム からの 距離
Kダム	469 km <sup>2</sup>	1300	40	1920 m	290 m	0
Tダム	1662 km <sup>2</sup>	370	150	2077 m	120 m	約45 km
A地点	2531 km <sup>2</sup>			2077 m	41 m	約65 km

ダム容量の単位は容量を1日の秒数(24\*60:60)で除した値、利水として利用可能な最大容量

## 3 マスカーブを用いた近年の流況把握

近年の流況把握を目的に、Tダム地点の近年の自然流量（Kダムが無かった場合の流入量）を用いて、マスカーブからTダム完成後の流況を把握する。マスカーブを用いることによりダムにどの程度の水を蓄えておけば良いか把握することができる。本節では各ダムの操作方法などについては考慮していないため、簡易な流況把握を目的に算出したものである。図-2にその結果を示すが、縦軸のVは式-1から算出した。

$$V = \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{irr}) \quad (式-1)$$

ここで  $n$  は4月1日からの日数,  $Q_{irr}$  は一定量としてA地点の平均的な確保流量を用いた. また  $Q_i$  はTダム地点日平均自然流量で式-2から算出しており, 利水による影響は除外していない.

$$Q_i = Q_{Tin} - Q_{Kout} + Q_{Kin} \quad (\text{式-2})$$

ここで  $Q_{Tin}$  はT地点の日平均流入量,  $Q_{Kout}$  はK地点の日平均放流量,  $Q_{Kin}$  はK地点の日平均流入量である.

また農業利水終了月日の8月31日の  $V$  を0とした. なお縦軸の  $V$  の単位は  $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{d}$  であり, 容量 ( $\text{m}^3$ ) を一日の秒数 86,400 秒で割ったものを用いている.

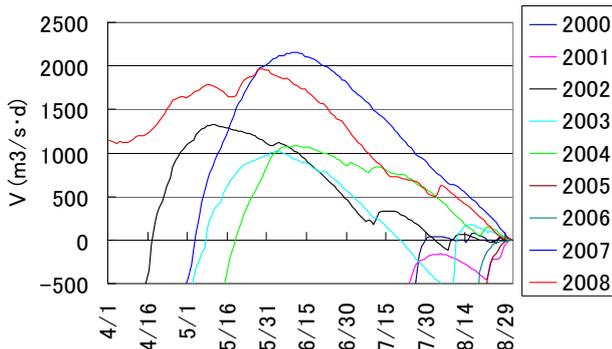


図-2 Tダム地点のマスカーブ

この結果のみから判断すると9年間の内, 2008年, 2007年の2年間は  $V$  がTダムとKダムの合計最大容量より大きく, 節水が不可避と考えられる. 特に2008年の場合は,  $V$  のピークが早い. このことは, 節水は不可避であるものの, 貯留を早めることで, 節水規模を軽減できる可能性があることを示す. 一方, 2002年の場合は,  $V$  の最大値は2008年の7割に留まる. このことから, 渇水時の貯留時期を早めることで, 渇水の軽減が可能となる. そのため次節において, 渇水傾向を予測する方法の1つとして気象, 水文データを用いた方法の可能性を探った.

#### 4 低標高流域データを用いた渇水予測手法の検討

融雪出水時期の予測において, 流域内データの補完と他流域への拡張のため, S川の隣接流域なども含めた気象, 水文データを活用について検討する. 検討に用いたS川流域内外の流域データの諸元を表-2に示す. 各地点の18年間の平均流量ハイドロを図-3に示す. この図よりU地点, Kダム, Tokダム, Tisダム, Ti地点と順に融雪出水のピークを迎えるパターンであることがわかる. このハイドロの最大値つまり融雪出水のピークの生起月日と流域平均標高との関連を図-4に示す. ここで流域平均標高は流量観測地点と流域最大標高の平均から算出した. このように低標高流域から順に融雪が進んでいることがわかる. 一方, 直列配置のTダムとKダムでは, ほぼ相似した形の流出パターンであることがわかる.

表-2 流域緒元

		流域面積	流域最大標高	地点標高	Kダムからの距離
S川流域	Kダム	469 km <sup>2</sup>	1920 m	290 m	0
	Tダム	1662 km <sup>2</sup>	2077 m	120 m	約45 km
	A地点	2531 km <sup>2</sup>	2077 m	41 m	約65 km
その他流域	O地点 (O川流域)	181 km <sup>2</sup>	577 m	100 m	約65 km
	U地点 (U川流域)	475 km <sup>2</sup>	1247 m	106 m	約60 km
	Ti地点 (Ti川流域)	358 km <sup>2</sup>	2290 m	117 m	約50 km
	Tisダム	292 km <sup>2</sup>	2244 m	760 m	約70 km
	Tokダム	592 km <sup>2</sup>	2141 m	280 m	約40 km

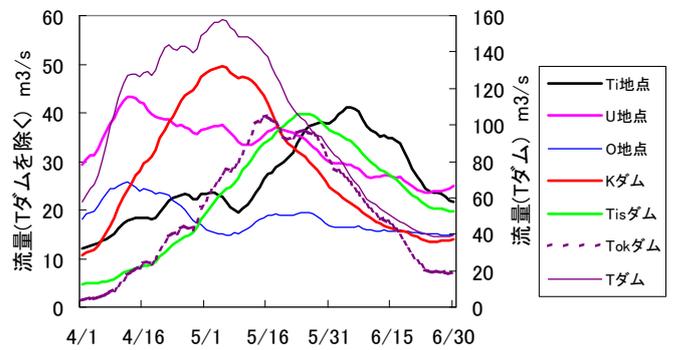


図-3 融雪時の各地点の流量パターン (7日間移動平均, 18年間分の平均,)

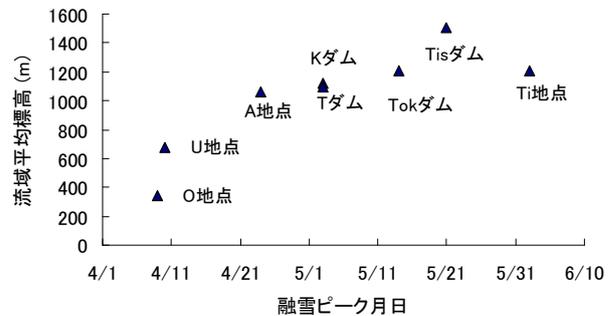


図-4 流域平均標高と融雪ピークの生起月日

このように, 一般に, 融雪は, 標高が低いところから高い方へと進むことから, 低標高流域の流量の渇水傾向は, Kダムの流入量(最大標高1920m)の渇水傾向より先行しているとの仮説のもとに以下に比較を行う. さらに気象データも加味して, より相関の高い予測式の抽出を行う.

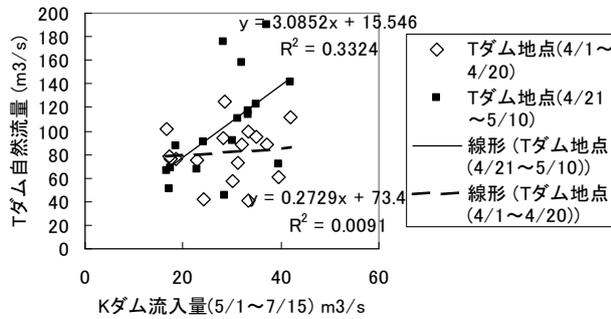
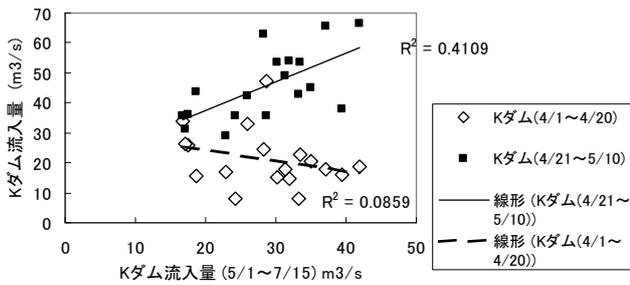


図-5 流域内各地点の平均流量(4/1~5/10)と K ダム平均流入量(5/1~7/15)

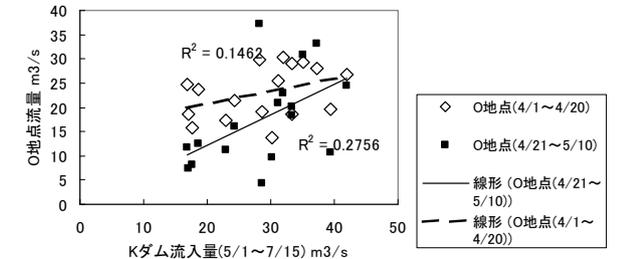
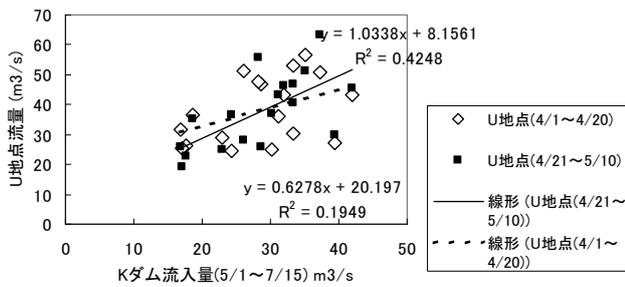


図-6 流域外各地点の平均流量(4/1~5/10)と K ダム平均流入量(5/1~7/15)

図-5, 6は1984年から2001年までの各地点の流量データとKダムの流入量との相関を示す。結果を表-3に整理した。

U地点については4月1日~4月20日および4月21日~5月10日いずれの平均流量においても、S川流域外でKダム地点から距離が離れているにも関わらず、相関が高かった。U地点については、流域内の最大標高がKダムの2000m弱と比較して700m程、低く、その分、融雪時期が早いから、相関が高かったと考えられる。一方、最大標高が1400mも低いO地点では、逆に標高が低すぎて、積雪量等の条件が異なりすぎたのではないかと推測される。

表-3 Kダム流入量(5/1~7/15)と5月上旬前の各地点流量との相関

	Kダム流入量との相関 R		流域面積	流域最大標高	地点標高	Kダムからの距離
	4/1~4/20	4/21~5/10				
Kダム	0.30	0.64	469 km <sup>2</sup>	1920 m	290 m	0
Tダム地点	0.00	0.58	1662 km <sup>2</sup>	2077 m	120 m	約45 km
O地点(O川流域)	0.39	0.53	181 km <sup>2</sup>	577 m	101 m	約65 km
U地点(U川流域)	0.44	0.65	475 km <sup>2</sup>	1247 m	106 m	約60 km

表-4 各地点流量(5/1~7/15)と5月上旬前のU地点流量との相関

	U地点流量との相関 R		流域面積	流域最大標高	地点標高	U地点からの距離
	4/1~4/20	4/21~5/10				
Ti地点(Ti川流域)	※ 0.63	0.65	358 km <sup>2</sup>	2290 m	117 m	約3 km
Tisダム地点	0.51	0.58	292 km <sup>2</sup>	2244 m	760 m	約40 km
Kダム地点	※ 0.44	0.65	469 km <sup>2</sup>	1920 m	290 m	約60 km

次に最も相関の高かったU地点(低標高流域)とTi地点(Ti川流域, 最大標高2290m)およびTisダム地点(最大標高2244m)との相関を図-7, 8, 表-4に示す。いずれも比較的、高い相関が得られた。表-4の※印で、U地点流量(4/1~4/20)とKダム流入量(5/1~7/15)との相関が0.44であるのに対して、Ti地点流入量(5/1~7/15)との相関が0.63と高いのは、地点間距離や標高の差異によるものと考えられる。

以上より流域の最大標高が1900mから2300mの3つの高標高流域の流量と最大標高1200mの流域における1か月ほど前の流量との相関が確認できた。

つまり、5月上旬までの低標高流域の流量データから、高標高流域の各ダムの貯留に重要な5月~7月の平均流量を予測する一助となることがわかる。

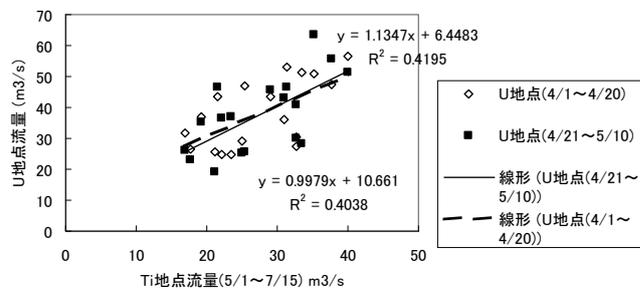


図-7 U地点平均流量(4/1~5/10)とTi地点平均流量(5/1~7/15)

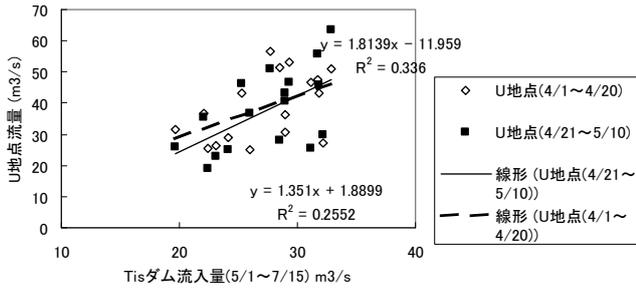


図-8 U地点平均流量(4/1~5/10)とTisダム平均流入量(5/1~7/15)

また融雪出水のピークの生起日やピーク流量についても、気象、水文データから予測できないか重回帰分析を用いて検討した。1983年から2008年までの水文気象データを独立変数として、Kダムの融雪ピーク流量生起日(1/1からの日数, 7日間移動平均のピーク)を従属変数とした。独立変数の候補は桜開花日(1/1からの日数), 3月1日のKダム積雪深, 3月の平均気温(Kダム地点), 積雪0になった日(1/1からの日数, U地点)を用いた。この独立変数群(標高約100m地点の桜開花日, 標高約350m地点の積雪深等)は、低標高域の気象データである。重回帰分析による結果は式-3となり、予測値と実測値を比較したのが図-9になる。

$$D_{cal} = 1.02C + 0.31S - 23 \quad (\text{式-3 重回帰式})$$

ここで  $D_{cal}$  は融雪ピーク月日(1/1からの日数),  $C$  は桜開花日(1/1からの日数),  $S$  は3/1のKダム積雪深である。

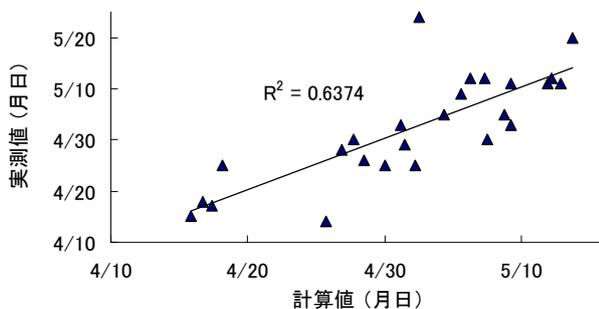


図-9 Kダム融雪ピーク月日の計算値(式-3)と実測値

次に従属変数にKダムの融雪時の7日間平均流量のピークを用い、独立変数の候補は、U地点(4月)の7日間平均流量のピーク、桜開花日(4/20からの日数), 3月1日のKダム積雪深, 3月の平均気温, 積雪0になった日(3/1からの日数), Kダム融雪ピーク時の7日間降雨量を用いた。その結果、U地点(4月)の7日間平均流量のピークのみが独立変数となった。

図-10はその結果である、U地点(4月)とKダムの融雪時の7日間平均流量のピークとの関係を示す。なおU地点(4月)のピーク生起日からのKダムの融雪ピークまで

の遅れ日数は平均19日だった。

図-11は、独立変数候補の中で2番目に相関が高かった「積雪0になった日」との関係を示している。この場合、Kダム融雪最大流量時との対応関係も悪くなく、Kダムピーク流量が  $80\text{m}^3/\text{s}$  以上の時の予測には、「積雪0になった日」を用いた方が良く、逆にKダムピーク流量が  $60\text{m}^3/\text{s}$  未満の時には、U地点のデータを用いた方が良く目的に応じた使い分けでカバーできる可能性もある。

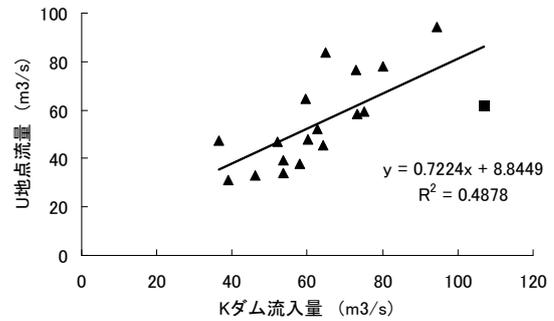


図-10 U地点(4月)とKダムの融雪ピーク流量(7日間移動平均の最大値, 18年間のデータ)

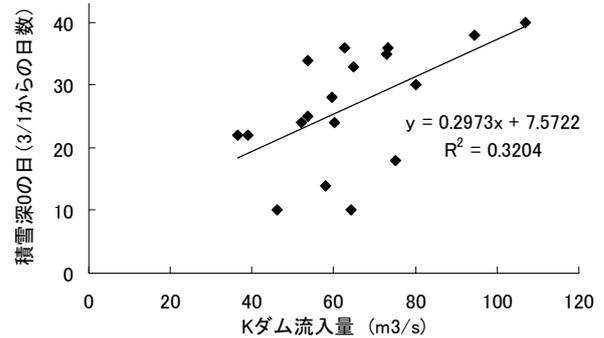


図-11 積雪深データとKダムの融雪ピーク流量

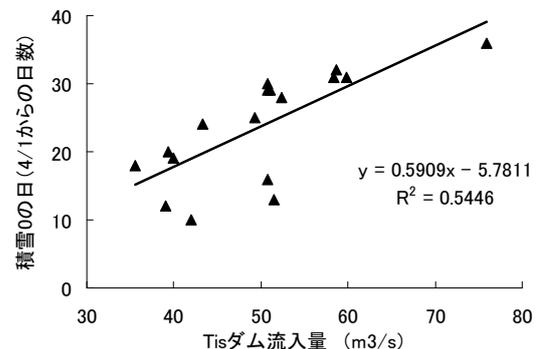


図-12 積雪深データとTisダムの融雪ピーク流量

同様な独立変数候補を用いてTisダム融雪最大流入量を従属変数とした重回帰解析を行った結果、「積雪0になった日」のみが独立変数として残った。図-12にその対応関係を示すが、 $R=0.74$ と高い相関となった。両者の独立変数に違いが生じた原因として、Tisダム地点はK

ダム地点よりも500m弱標高が高いため、ダム地点の積雪深データが流域の包蔵積雪量を代表していたのではないかなどが推測される。同様にTisダムの融雪最大流入月日を従属変数として、重回帰分析を行うと、 $R=0.65$ で桜開花日のみが独立変数となった。データを追加して1984年～2008年までのデータを示したのが図-13であり、 $R=0.63$ となった。同様にTokダムの分析結果はKダムの結果(式-3)と類似した式-4となり、図-14で計算値と実測値を比較しており、 $R=0.76$ となった。この独立変数群(標高約100m地点の桜開花日、標高約350m地点の積雪深等)も、低標高域の気象データである。

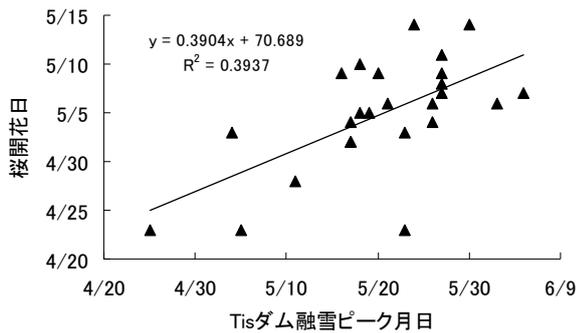


図-13 桜開花日とTisダムの融雪ピーク月日 (25年間のデータ)

$$D_{cal} = 1.53C - 0.503S - 211 \quad (\text{式-4 重回帰式})$$

ここで  $D_{cal}$  は融雪ピーク月日(1/1からの日数)、 $C$  は桜開花日(1/1からの日数)、 $S$  は3/1のKダム積雪深である。

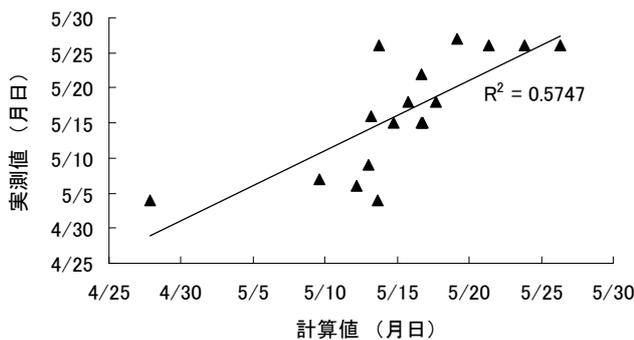


図-14 Tokダム融雪ピーク月日の計算値(式-4)と実測

このように、ピーク流量の予測においても、融雪モデル等を用いずに簡易な方法でも、ある程度まで予測できることがわかる。特に時期の予想と相関の高かった桜の開花予想は4月上旬頃から気象庁をはじめとする複数社が予想を競っていることから、1、2か月単位での貯留計画が求められるダム管理に、このように相関の高い気象データを活用することは、有意義であり、なおかつ、時間差のある現象の活用は、早い時期に予測できるとい

うメリットを有すると考える。

以上、既往の融雪モデル、流出解析モデルなどを使わずに、降雨量以外の気象データと水文データから融雪時期を予測する方法についての基礎的な検討を行った。ただし精度を高め、一般化や理論化という視点からは、既往の融雪モデル、流出解析モデルなど<sup>3,4)</sup>からのアプローチも必要と考える。同時に積雪量計の設置、ランドサットデータの活用など、ハード、ソフト両面から融雪予測の精度向上を行っていくことが必要と考える。

## 5 今後の課題

実務的には、予測した結果をどのように実運用に用いるかが重要であり、前章までの検討などをベースに、リアルタイムに渴水を予測することが重要な課題である。現在、詳細は精査中なため、ここでは今後の課題として、その概要の報告に留める。

表-5 Case1とCase2の計算条件

	貯留計画	貯留計画の修正	放流量の調整
Case 1	積雪量のみで貯留計画を作成	修正なし	流入量や流量データ、貯水量、貯留計画値に応じて放流量を自動調整
Case 2	流入量を重回帰分析(式-3)により予測して貯留計画を作成	閾値条件より下がった場合に貯留計画を上積み(表-6参照)	流入量や流量データ、貯水量、貯留計画値に応じて放流量を自動調整

まず表-5のようにCase1は自然体な水収支計算、Case2は融雪時期が早いことが予測される場合、貯留計画を上積みした場合との比較を行った。Case2では、残流量等(表-6)が一定値以下に減少した時、式-7のように多段階評価し、その合計点を  $Z_{day}$  (式-6)として、渴水傾向を示す指標とし、式-3を加味した  $B_{day}$  (式-5)に応じて貯留計画を上積みするものである。

$$B_{day} = Z_{day} - mD_{cal} \quad (\text{式-5})$$

ここで  $day$  は1/1からの日数、 $m$  は係数でS川流域では1.1前後で最適、 $D_{cal}$  は式-3である。

$$Z_{day} = \alpha Z_{day-1} + k_1 y_1 + k_2 y_2 + k_3 y_3 \quad (\text{式-6})$$

ここで  $\alpha$  (1.0未満)は前日の値を漸減させる係数、 $k_n$  は図-12参照である。

$$y_n = \begin{cases} 3 & (x_n < t_{1n}) \\ 2 & (t_{1n} < x_n < t_{2n}) \\ 1 & (t_{2n} < x_n < t_{3n}) \end{cases} \quad (\text{式-7})$$

このような手法による1日単位のリアルタイムモニタリングで、渴水傾向が判別された日に貯留計画の上積みや従属発電(他の水利用に従って行う発電、Kダム、Tダ

ムでは確保容量割れ時に基本となる発電)に切り替えることなど細かい条件設定をし、その流域やダムの特徴に応じた最適化を図っていく必要がある。

結果については精査中ではあるが、リアルタイムに渇水情報をモニタリングし、運用計画を修正することで、確保容量割れの頻度を少なくできる。また逆に豊水時などについても、このような方法を逆に応用していく可能性も考えられる。

以上、汎用的な表計算ソフトで、10年以上の水文データを用い、確保容量割れの頻度と無効放流量との両面から最適な運用について検討中である。現場技術者が生データを表計算ソフトなどで直接的に用いることは、有用と考える<sup>5)</sup>。現場感覚、直感的な感覚が養われること、ブラックボックスとならないこと、修正していくことが容易なこと、各種チェック体制には即断即決や直感が欠かせないことなど、複雑な現象に経験工学的な方法や簡易な方法が実務的に有利な点が多く、その点も踏まえて今後、整理していきたい。

なお本報告において国土交通省水文水質データベース、札幌管区气象台による桜の開花日の経年データ等を用いた。

表-6 貯留計画の上積みに用いた条件例(式-6)

$x_n$	閾値 $t_{1n}, t_{2n}, t_{3n}$
$x_1$	A地点の残流量(60~30m <sup>3</sup> /sec)
$x_2$	TダムとKダムの合計貯水容量
$x_3$	T地点の残流量(80~50m <sup>3</sup> /sec)
$D_{cal}$ (式-3)	桜の開花日(U地点), 積雪量(Kダム)

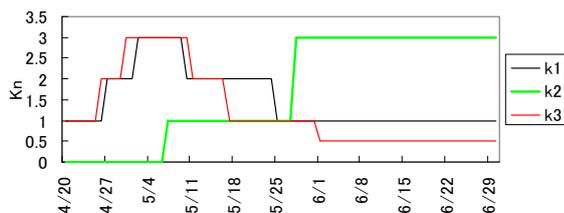


図-12 式-7における月日毎の係数( $k_n$ )の設定例

## おわりに

得られた結果を以下に示す。

- 1) 対象流域においてマスカープを用いて、近年の流況の概略把握を行った結果、渇水時には、融雪時期のダムへの早期貯留により、渇水を緩和できる可能性を示した。
- 2) 融雪ピーク時期等の予測において、相対的に標高が低い地点における水文気象データの活用予測の可能性を示した。
- 3) 上記を取り込んだリアルタイムな簡易渇水予測方法の概略を示した。

## 参考文献

- 1) 池淵周一：流域水循環と水利用・水資源開発, 土木学会水理委員会, 海岸工学委員会, 水工学に関する夏期研修会講義集, 第36回, Aug, 2000.
- 2) 竹内邦良, 吉川秀夫：渇水持続曲線法とマスカープ法, 土木学会論文報告集, 第303号, Nov, 1980.
- 3) 小池俊雄, 高橋裕, 吉野昭一：積雪面積情報による流域積雪水量の推定, 土木学会論文報告集, 第357号, May, 1985.
- 4) 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, Feb, 2003.
- 5) 野上毅, 渡邊康玄, 中津川誠：魚類生息環境調査の簡易解析手法, 開発土木研究所月報, No593, Mar, 2001.