

# 積雪寒冷地の河川における 融雪予測の有効性の検討

旭川開発建設部 治水課 ○伊藤 貴寛  
佐々木 猛  
長尾 鉄彦

本論文では、融雪期の水位予測に対し融雪予測を活用することの有効性を評価した。対象流域は名寄川に位置する真勲別水位観測所(流域面積: 695.0 km<sup>2</sup>)であり、はん濫注意水位を超えた2006年5月10日~11日の出水を解析対象とした。評価の着眼点は、1) 推定される融雪量を用いてハイドログラフが再現できるか、2) 予測融雪量から算出される水位にどれだけの誤差があるのか、の2点である。検討の結果、融雪量から計算されるハイドログラフには良好な再現性のあることが確認された。また、予測融雪量から計算される水位は6時間先であっても平均20cm程度の誤差に収まっていた。以上から、予測融雪量は水位予測に有効であるものと考えられた。

キーワード: 防災、自然災害、融雪予測

## 1. まえがき

積雪寒冷地の河川における年最大流量の出現時期は、全体の約5割の事例が4月~5月の融雪期に発生しており、少ない降雨にもかかわらず被害をもたらすほどの大きな出水に至るケースが見られる。また、地球温暖化に伴う春先の大雨の頻発が懸念されていることから<sup>1)</sup>、河川管理上、降雨出水と同様に融雪出水に対しても十分な配慮が必要といえる。

当建設部が管轄する真勲別水位観測所(名寄川)では、2006年5月10日~11日の降雨によってはん濫注意水位を超える出水が発生した。この2日間の総降水量は44mm(下川)、これに対し真勲別の総流出高は80mmを超え、融雪水が大きく関与していたものと考えられた。また、下川の積雪は5月1日時点で無くなっており、山間部に残る雪が出水規模を大きくしたものと見える。

このようなことを背景に、2007年度から融雪に関する予測情報を入手し、夏期洪水と同様な水位予測を始めたところである。しかしながら、融雪量は気象因子に基づく推定値であり、その値の確からしさについては確認されていなかった。その上、気象予測値に基づく推定となると、予測融雪量の持つ誤差は小さいものとは考えにくく、この点についても確認が必要であった。

そこで本研究では、積雪寒冷地河川における融雪期の水位予測への融雪予測の合理的な活用を目指し、その第一歩として、2006年5月10日~11日の出水事例を採り上げ融雪予測の有効性を検討した。具体的には、次のような作業を行った。

① 気象因子から推定される融雪量を用いて融雪ハイドログラフを再現し、推定される融雪量がハイドログラフを再現し得るものであるのかを確認した。

② 夏期出水で決定された流出モデルをそのまま融雪期に利用できれば、現有の洪水予測システムを変更することなく融雪期の水位予測が実現できる。そこで、夏期の流出モデルと融雪期の流出モデルから算出されるハイドログラフを比較した。

③ 実際の水位予測の運用を想定し、当時発表されていた気象予測情報と名寄川流域の予測雨量から融雪量を算出し、それを基に水位予測を行った。

以上の作業から次のことが分かった。

① 融雪量によって融雪ハイドログラフが再現できた。  
② ただし、用いる流出モデルは、夏期洪水でチューニングしたものではなく、融雪洪水によって決めたモデルを用いることが必要であった。夏期洪水で決定した流出モデルを用いると、洪水時の再現性が悪かった。

③ 水位予測の精度は、融雪期の洪水事例から決定した流出モデルの場合、6時間先の予測であっても20cm程度の誤差(平均二乗誤差の平方根: RMSE)であった。また、予測に用いる流出モデルとしては、1段タンク型貯留関数モデルより、地下流出成分を考慮した2段タンク型貯留関数モデルが有効であった。

以上の結果、予測融雪量は水位予測に有効であるものと考えられた。以下、対象流域、融雪予測手法の概要、融雪ハイドログラフの再現と洪水予測結果の順に詳述する。



図-1 真勲別流域(流域面積：695.0km<sup>2</sup>)  
 緑色の○：気象庁アメダス、黒色の○：雨量観測所

## 2. 対象流域

対象流域は天塩川水系名寄川に位置する真勲別水位観測所(流域面積：695.0 km<sup>2</sup>)とした(図-1)。流域の標高は100 m～900 m の範囲にあり、流域の約 50 %は 300 m～500 m の標高帯が占める。積雪期間は11月～翌年5月上旬の約 6 ヶ月間、融雪に伴う増水期は4月中旬～5月下旬までの約 1 ヶ月半である。

流域内および周辺には、2 箇所のアメダス、また、10 箇所の雨量観測所(そのうち 3 箇所は冬期閉局)がある。これらのデータを基に融雪量を推定する。

## 3. 融雪量予測手法の概要

融雪量の計算手順を図-2 に示す。計算は、まず、流域内の積雪分布を推定し、融雪水の発生する範囲を特定する。積雪分布の推定にあたっては、積雪状態(積雪深、積雪相当水量)、降水量、蒸発散量が的確に推定され、かつ、長期的な水収支が担保される手法が必要となる。ここでは、水・熱フラックスの計算に植生が考慮できる2層モデル<sup>2)</sup>を基本にした長期水・熱収支モデル<sup>3)</sup>を採用している。

次に、以上で推定された積雪分布に基づいて、メッシュ単位で融雪量が算出される。このとき、降水の雨雪判別も同時に行う。このように得られた融雪量と雨量を積雪浸透モデルに入力し、積雪底面から土壌に供給される水量が得られる。融雪モデル・積雪浸透モデルは臼谷・中津川・星ら<sup>4)</sup>の提案する方法を採用している。

以上の一連の計算に対して、実測された気象データを入力すれば融雪量の推定値が得られ、また、予測気象情報を入力すれば雨量・融雪量の予測値が得られる。この手法で2006年4月～5月の雨量・融雪量を推定した結果を図-3 に示す。図中、青色の棒グラフは融雪量、赤色

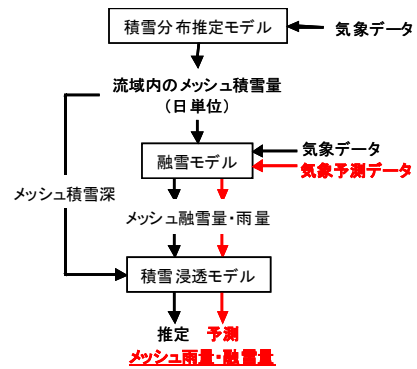


図-2 融雪量予測の手順

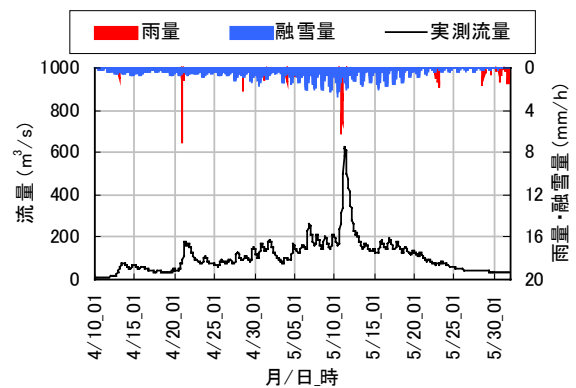


図-3 融雪量の推定結果(真勲別流域)

の棒は雨量、黒色の実線は流量を表す。図によれば、融雪に伴う増水期間と顕著な融雪が起きている期間が一致することが分かる。また、ハイドログラフと融雪量の日変化が対応していることも、この図から読み取れる。4月10日～5月31日の雨量・融雪量の合計は728 mm、それに対して流出高の合計は688 mmであり概ね一致した。この雨量・融雪量によって融雪ハイドログラフが再現できるかを、次に調べる。

## 4. 融雪量に基づくハイドログラフの再現

### (1) 流出モデル<sup>5)</sup>

ここでは、次に示す2種類の流出モデルを用いた。

- ・ 1 段タンク型貯留関数モデル

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = r - q - b + q_0 \\ s = k_{11}q^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \\ b = k_{13}q \\ q_0 = q_B \exp(-\lambda t) \end{cases} \quad (1)$$

$$k_{11} = c_{11}A^{0.24}, k_{12} = c_{12}k_{11}^2 (\bar{r})^{-0.2648} \quad (2)$$

ここで、 $s$ ：貯留高(mm)、 $r$ ：土壌供給水量(mm/h)、

表-1 最適モデル定数

流出モデル	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$
1段(冬)	7.146	0.310	1.169
2段(冬)	4.622	0.579	1.450
1段(夏)	4.771	0.180	1.453
2段(夏)	2.613	0.619	2.021

$q$  : 観測流出高 (mm/h)、 $b$  : 損失高 (mm/h)、 $q_0$  : 基底流出高 (mm/h)、 $q_B$  : 初期流出高 (mm/h)、 $k_{11}, k_{12}$  : 貯留係数、 $k_{13}$  : 浸透係数、 $p_1, p_2$  : 貯留指数 ( $p_1=0.6$ 、 $p_2=0.4648$ )、 $\lambda$  : 減衰係数 (=0.019)、 $t$  : 時間 (h)、 $A$  : 流域面積 (km<sup>2</sup>)、 $\bar{r}$  : 平均雨量強度 (mm/h)、 $c_{11}, c_{12}$  : 未知定数。

・ 2 段タンク型貯留関数モデル

$$\begin{cases} s_1 = k_{11}q^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \\ \frac{ds_1}{dt} = r - q_1 - f_1 \\ f_1 = k_{13}q_1 = k_{13}(q - q_1) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} s_2 = k_{21}q_2 + k_{22} \frac{dq_2}{dt} \\ \frac{ds_2}{dt} = f_1 - q_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} k_{11} = c_{11}A^{0.24}, k_{12} = c_{12}k_{11}^2(\bar{r})^{-0.2648} \\ k_{22} = 1/c_0, k_{21} = c_1k_{22} \\ c_0 = (\delta/T_c)^2, c_1 = \delta^2/T_c \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $s_1, s_2$  : 1 段目タンクおよび 2 段目タンクの貯留高 (mm)、 $r$  : 土壌供給水量 (mm/h)、 $q_1, q_2$  : 表面・中間流出高および地下水流出高 (mm/h)、 $b$  : 1 段目タンクから 2 段目タンクへの浸透供給量 (mm/h)、 $k_{11}, k_{12}$  : 貯留係数、 $k_{13}$  : 浸透係数、 $p_1, p_2$  : 貯留指数 ( $p_1=0.6$ 、 $p_2=0.4648$ )、 $A$  : 流域面積 (km<sup>2</sup>)、 $\bar{r}$  : 平均雨量強度 (mm/h)、 $T_c$  : 地下水流出成分の時定数、 $\delta$  : 減衰係数 (=2.1)、 $c_{11}, c_{12}$  : 未知定数。なお、 $T_c$  は 51.733 (h) を採用した。

## (2) 融雪ハイドログラフの再現性

当課では、夏期洪水を対象にした真敷別流域の流出モデル定数を検討しており、融雪期の水位予測を行う際、夏期の流出モデル定数があるまま使えば現在の洪水予測システムを変更することなく融雪洪水予測が行える。そこで、検討の一つとして、夏期洪水の流出モデル定数をそのまま用いてハイドログラフを再現する。しかしながら、流域の流出応答は夏期出水と融雪出水とで異なるものと考えるのが一般的である。そこで、融雪出水で流

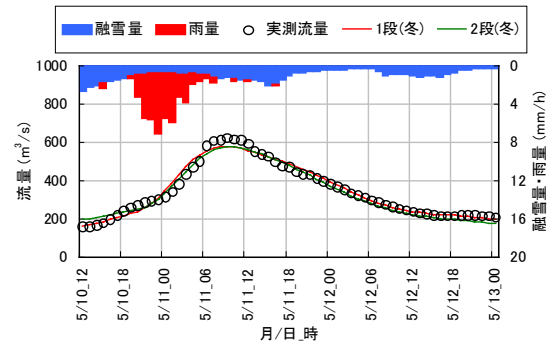


図-4 最適モデル定数の探索結果

出モデルをチューニングし、それを用いたハイドログラフも計算する。したがって、前項で示した 2 種類の流出モデル、また、夏期用・融雪期用の 2 種類のモデル定数をそれぞれ組み合わせ、合計 4 種類の計算方法でハイドログラフを再現する。なお、以下では、1 段タンク型貯留関数モデルの夏期用を 1 段(夏)、融雪期用を 1 段(冬)、2 段タンク型貯留関数モデルの夏期用を 2 段(夏)、融雪期用を 2 段(冬)と略記する。

1 段(冬)・2 段(冬)における流出モデル定数の最適値の探索には、星の提案する一次微係数を利用した一階ニュートン法<sup>6)</sup>に準拠した。また、最適値の探索に関して臼谷・星・中津川ら<sup>4)</sup>は、融雪期のモデル定数は、規模の大きな出水 1 例で決めたとしてもそのモデル定数は実用上十分な再現精度を持つことを指摘している。そこで本報告では、2006 年 5 月 10 日の出水によってモデル定数を決定することにした。

以上によって得られたモデル定数を表-1 に、また、その値によって計算されたハイドログラフを図-4 に示す。なお、表-1 には 1 段(夏)および 2 段(夏)のモデル定数も合わせて示した。図中、○印は実測流量、赤色と緑色の実線は 1 段(冬)と 2 段(冬)で算出されたハイドログラフ、青色および赤色の棒グラフは融雪量と雨量を表す。図によれば、2 種類の流出モデルで計算されたハイドログラフは実績流量と一致し、両者とも同程度の再現性を持つことが分かる。

以上で得られた 2 種類の融雪期用の流出モデルを含め、4 種類の計算手法を用いて融雪期全体のハイドログラフを再現した結果が図-5 である。図中、灰色の面は実績流量、赤色・緑色の太い実線は 1 段(冬)・2 段(冬)による再現結果、赤色・緑色の細い実線は 1 段(夏)・2 段(夏)による再現結果を表す。また、赤色の棒グラフは雨量、青色の棒グラフは融雪量である。図によると、4 種類のモデルとも、融雪の開始から終了までの流量の増減傾向は概ね再現されている。

しかしながら、5 月中旬の出水時の流出波形(図-5 の黒色の破線で囲んだ部分)において、4 種類の流出モデルの再現性に差が見られる。その部分を拡大したものが図-6 である。この図によると、ピーク流量の大きさは 2 段(夏)の計算結果が実測値に最も近いものの、ピーク後

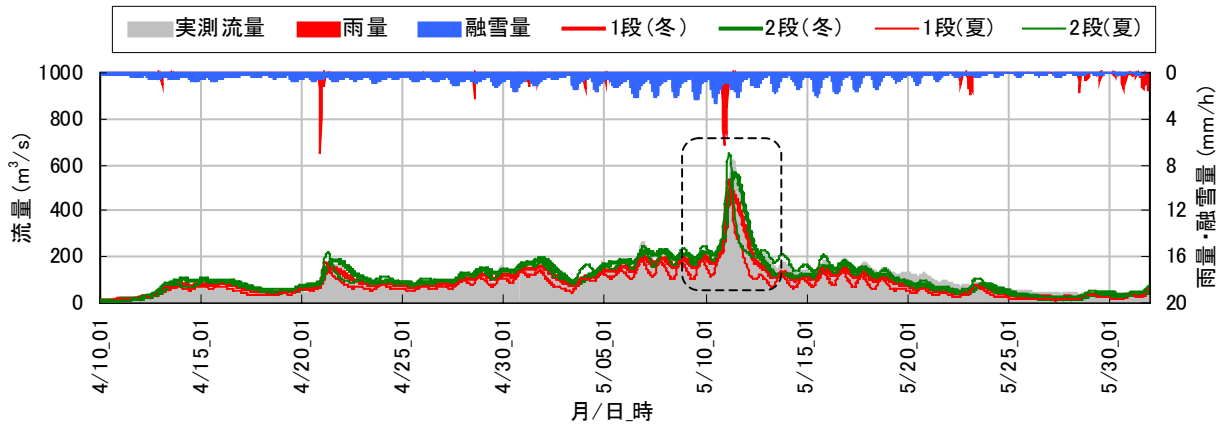


図-5 最適モデル定数による融雪期ハイドログラフの再現結果

表-2 誤差指標 (算出期間: 4/10~5/31)

モデル	RMSE (m³/s)	Nash-Sutcliffe 指標
1段(冬)	27.11	0.89
2段(冬)	25.07	0.91
1段(夏)	50.39	0.62
2段(夏)	34.86	0.82

の減衰が速く波形全体の再現性が悪い。このような傾向は1段(夏)の再現結果にも見られる。一方2段(冬)は、ピーク流量の再現性は2段(夏)よりやや劣るものの、ピーク後の減衰部を含めた波形全体の適合度が高い。この差の原因は流出モデル定数にある。表-1によると、夏期洪水で決めた $c_{11}$ は融雪洪水による値に比べて小さい。モデル定数 $c_{11}$ は貯留係数 $k_{11}$ を決める値であり、この値が小さければ降雨に対する流出の応答が速くなり、これに伴って流量の減衰も速くなる。このような理由から、減衰部の再現性に大きな差が現れたものといえる。

表-2は再現誤差に関する指標である。2種類の誤差は次式で求めた。

$$\text{平均二乗誤差の平方根 } RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{ci})^2} \quad (6)$$

$$\text{Nash-Sutcliffe 指標} \quad E_i = 1 - \frac{F_i}{F_*} \quad (7)$$

$$F_i = \sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{ci})^2, F_* = \sum_{i=1}^N \left( q_{oi} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_{oi} \right)^2$$

ここで、 $q_{oi}$ : 観測流量 (m³/s)、 $q_{ci}$ : 計算流量 (m³/s)、 $N$ : データ数。Nash-Sutcliffe 指標  $E_i$  は、値が1に近いほど観測値と計算値の適合度が高いことを表わし、一般には0.8程度を超えていれば良好な再現結果が得られたものと判断される。

表-2によると、1段(夏)を除いては、Nash-Sutcliffe 指標が0.8を越えていることから、再現性は良好といえる。しかしながら、河川を管理する上で洪水期間の再現性が重要であることを考えれば、洪水波形の再現性の高い1

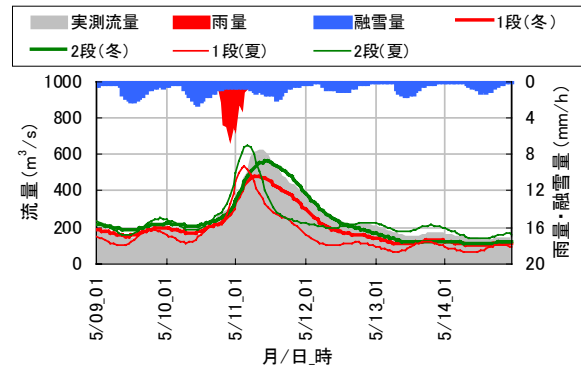


図-6 最大出水事例の再現結果

段(冬)か2段(冬)を採用するのが妥当と考えられる。

以上の結果、夏期洪水で決定された流出モデル定数を融雪期に使うのではなく、融雪洪水で決めた流出モデルを採用すれば、融雪量を有効に活用できるものと考えられる。

## 5. 予測融雪量に基づいた水位予測

以上では、推定された融雪量からハイドログラフを再現し、融雪量の有効性を調べた。ここでは、2006年5月10日~11日の出水を対象にして予測融雪量を用いた水位予測を行い、融雪予測の有効性を検討する。

### (1) 雨量および融雪量の予測値

予測融雪量は、気象予測値を第3章で述べた計算方法に入力することで得られる。使用する気象予測には、気象庁数値予測情報(GPV)と当時配信されていた予測雨量を用いた。GPVは、51時間先までの各種気象要素が1時間単位で予測された値であり、1日2回最新の情報に更新される。予測雨量は、名寄川を対象にして気象協会から提供を受けていたものであり、降雨時において不定期に配信される情報である。当時配信されていた時刻は5月10日10時・16時・19時・22時、また、5月11日1時・4時であり、合計6回の配信があった。これらを組み合わせ、最新の予測値の中から予測時点から6時間後

までの値を用い融雪量を計算した。

図-7 は、気象予測値から算出された雨量と融雪量である。図中、○印は実績値(融雪量は観測された気象データから推定した値)、赤色の実線は予測値を表す。どちらの値とも予測された時刻を基点として、そこからの累計値で示した。なお、○印と赤色の実線が一致すれば、予測値と実測値が一致していたことを表す。

図によると、予測雨量(上段の図)は、5月10日23時頃に○印と赤色の実線に開きが見られ、全般的に過少な予測値であった(図中、緑色の破線で囲んだ部分)。一方、予測融雪量(下段の図)は○印と赤色の実線がほぼ一致し

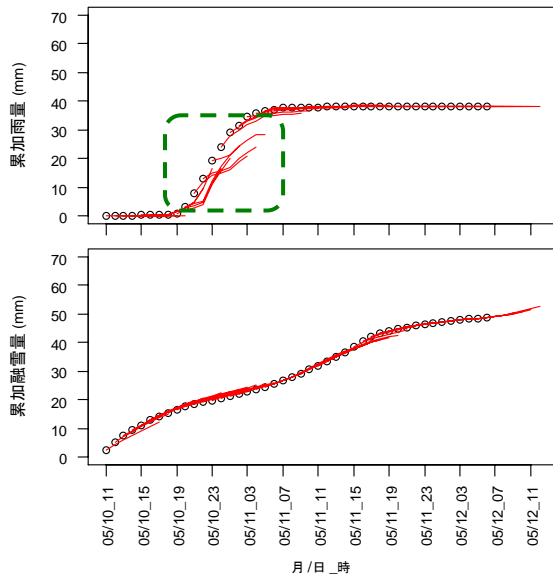


図-7 雨量と融雪量の予測値

上段：雨量、下段：融雪量。予測は6時間先まで。

ており適切な値が算出されていることが分かる。

## (2) 水位予測の精度

以上で示した雨量・融雪量の予測値を用い、前章で検討した4種類の流出モデルで水位を予測した。

計算手順は、まず、予測値(雨量・融雪量)から流出モデルによって流量を計算する。ここで得た値を、水位流量曲線式を用いて水位に変換する。変換には次に示す式を用いた。

$$\begin{cases} H = \sqrt{\frac{Q}{38.28}} + 100.42 & : Q \geq 697.96 \\ H = \sqrt{\frac{Q}{62.98}} + 101.36 & : 74.83 \leq Q < 697.96 \\ H = \sqrt{\frac{Q}{70.57}} + 101.42 & : Q < 74.83 \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $H$ ：水位(m)、 $Q$ ：流量( $m^3/s$ )。なお、実際の運用では、前年度の流量観測結果から作成した暫定式を使用している。もし、暫定式をここでの解析に使えば、これに伴う誤差が生じてしまい、雨量・融雪量の予測に伴う水位予測の誤差評価が難しくなる。そこで、運用とは異なるものの、確定された水位流量曲線式を用いることにした。また、流量を予測するにあたっては、カルマン・フィルターによる逐次補正<sup>8)</sup>も施した。

以上の処理の結果、図-8を得た。図中、○印は実績水位、赤色の実線は6時間先までの予測水位である。図によれば、1段(夏)および2段(夏)の水位予測結果は過少な危険側の予測となっている。一方、1段(冬)・2段(冬)の結果は、水位の上昇が開始した時刻は過少ではあ

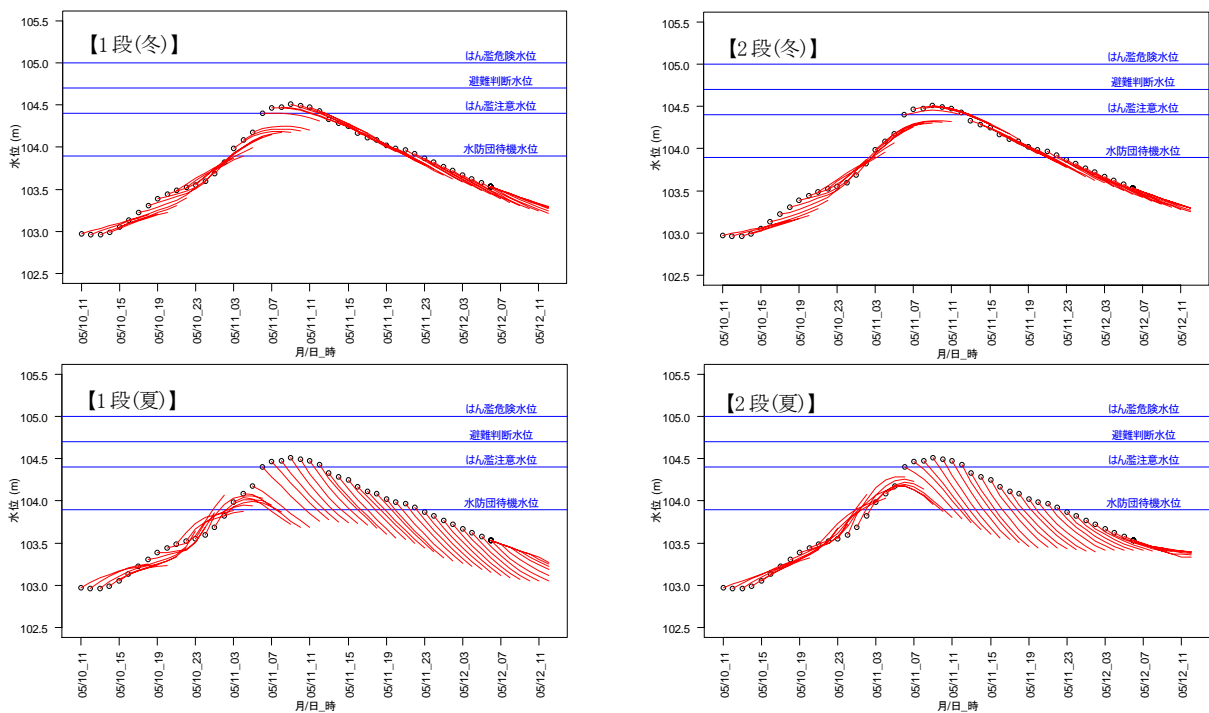


図-8 水位予測結果

上段左：1段(冬)、上段右：2段(冬)、下段左：1段(夏)、下段右：2段(夏)

るものの、水防団待機水位を超える頃の予測は良好である。

1時間～6時間先までの予測誤差(RMSE)を図-9に示す。上段は水位、下段は流量である。図中、赤色の実線は1段(夏)、黒色の実線は2段(夏)、赤色の○印は1段(冬)、黒色の○印は2段(冬)を表す。なお、RMSEは実績水位が水防団待機水位(103.90 m)以上の期間を対象に算出した。図によると、夏期洪水で決定された流出モデル(1段(夏)、2段(夏))のRMSEは、1段(冬)・2段(冬)の結果より値が大きい。その差は、リードタイムが長くなるのに伴って拡大している。1段(冬)のRMSEは6時間のリードタイムで20 cm程度、2段(冬)は10 cm程度であった。

以上の結果、水位予測においては融雪洪水によって流出モデル定数を決定しておけば、融雪予測を有効に活用できるものといえる。また、1段タンク型貯留関数モデルより、2段タンク型貯留関数モデルが有利であるという結果であった。

## 6. あとがき

本研究では、2006年5月10日～11日の出水事例を採り上げ、融雪予測の有効性を検討した。結果をまとめると次のとおりである。

- ① 4種類の流出モデルを用いて融雪期全体のハイドログラフを再現した結果、良好な精度で推定が可能であった。融雪期の流出量を推定する上で融雪量は有効であることが分かった。
- ② また、推定されたピーク流量は夏期洪水でチューニングした流出モデルは降雨時の再現性が悪く、融雪洪水でチューニングした流出モデルを使うことが必要と考えられた。
- ③ 予測融雪量を用い出水時の水位を予測した。その結果、融雪洪水でチューニングした流出モデルによる予測誤差は、6時間先のRMSEでは20 cm程度であった。
- ④ 融雪洪水の予測では、2段タンク型貯留関数モデルが最も有効であった。水位予測の精度の点ではやや劣るものの融雪洪水でチューニングした1段タンク型貯留関数モデルも有効と考えられた。

以上の結果を踏まえ、今後は、他の出水事例での検証に加え、他の管内流域においても融雪期用の流出モデル定数の決定などを進め、融雪予測を有効に活用し、より安全な河川管理に向け検討を進めたい。

### 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

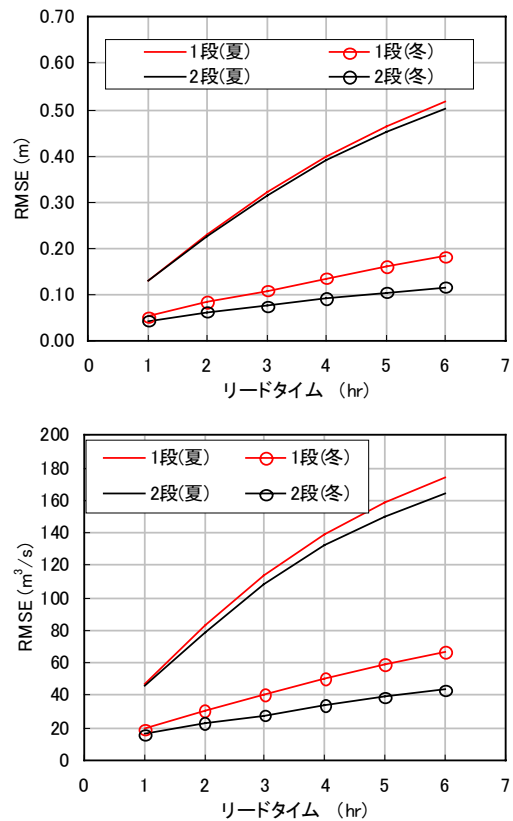


図-9 リードタイム別の誤差(上段：水位、下段：流量)

- 水循環へ与える影響、第13回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.1-6, 2005.
- 2) 近藤純正：水環境の気象学, 朝倉書店, 337p., 1994.
- 3) 白谷友秀・中津川誠・工藤啓介：石狩川流域における水循環の定量化, 北海道開発土木研究所月報, No. 628, pp.18-34, 2005.
- 4) 白谷友秀・中津川誠・星 清：積雪浸透を考慮した実用的融雪流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, Vol. 20., No. 2, pp.93-150, 2007.
- 5) 国土交通省・北海道開発局建設部河川計画課 監修, (財)北海道河川防災研究センター・研究所 編集・発行：単一流域を対象とした貯留関数法の精度比較, 189p., 2002.
- 6) 星 清：一次・二次導関数を用いた貯留型流出モデルの最適化手法, 平成17年度 第3回実践水文システム研究会 水文システムの同定と逆推定に関するシンポジウム, 55p., 2005.
- 7) Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. : River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles -, J. of Hydrology, Vol. 10, pp.282-290, 1970.
- 8) 国土交通省・北海道開発局建設部河川管理課 監修, (財)北海道河川防災研究センター・研究所 編集・発行：「実時間洪水予測システム理論」解説書, 396p., 2004.