

森林内外の積雪分布の特徴を組み込んだ 融雪・流出モデルの開発

DEVELOPMENT OF SNOWMELT RUNOFF MODEL INCORPORATING THE CHARACTERISTICS OF SNOW DISTRIBUTION IN FOREST AND NON-FOREST RANGE

西原照雅¹・中津川誠²・臼谷友秀³

Terumasa NISHIHARA, Makoto NAKATSUGAWA and Tomohide USUTANI

¹正会員 工修 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

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)

³正会員 工博 (一財) 日本気象協会 北海道支社 (〒064-8555 札幌市中央区北4条西23丁目)

The paper presents a new approach to estimating the dam inflow in snowmelt season. In the mountainous regions such as dam basins, the characteristics of snow distribution between inside forests and outside forests are very different. In the past research, relationships between snow depth and terrain in forests and non-forests were clarified respectively based on the result of airborne laser scanning. So we incorporated these characteristics in the snowmelt runoff model.

We estimated the dam inflow of the Jozankei dam and the Hoheikyo dam for past 10 years in snowmelt season. Compared with the observed inflow, estimation results were high level of accuracy.

Key Words : *Snowmelt runoff model, Dam inflow, Snow depth distribution, Forest, Non-forest*

1. はじめに

積雪寒冷地では、春先の融雪水をダムに貯留し、夏季にかけての水利利用を賄っている。このため、融雪水は水資源として重要である。一方で、融雪水は融雪出水の原因ともなる。北海道においては、気候変動により、融雪期に豪雨が発生する可能性が高まり、融雪と豪雨が同時生起して発生する異常出水が懸念されている¹⁾。

融雪期におけるダムや河川の流出量を予測するため、多くの融雪・流出モデルが提案されている。その多くは、雪面における融雪量を推定するモデルと河川の流出量を推定するモデルを組み合わせている^{2),3),4)}。例えば、臼谷ら⁴⁾は、融雪期の流出過程を、雪面における融雪、積雪内における水の流下、流出の3つに分け、これらを組み合わせた融雪・流出モデルを提案している。このモデルは、雪面において発生した融雪水が土壌に到達するまでの時間(積雪内の浸透時間)を考慮しており、より実際に近い融雪・流出現象が再現されている。

一方、近年、航空レーザ測量により広範囲の三次元空

間データを高密度に得ることが可能となり、このデータを用いて積雪分布と地形との関係を分析した結果が報告されている。西原ら^{5),6)}は、山間部の森林内と森林外

(例えば、森林限界以上の高標高帯)の積雪分布の特徴が異なることに着目し、森林の内外に分けて、航空レーザ測量を用いて計測した積雪分布と地形との関係を分析した。この結果を基に、ダム流域を森林の内外に分けて、流域の積雪分布や積雪包蔵水量を精度良く推定する方法を提案している。

北海道のダム流域では、ダム管理所をはじめとした複数の地点において、積雪深をテレメータで連続観測している。さらに、毎年3月上旬頃に積雪調査を行い、積雪相当水量を直接観測している。これらの観測値と西原らが開発した手法を用いれば、観測値を基にして流域の積雪分布を推定し、融雪・流出モデルで計算される積雪分布を補正することができる。西原ら⁷⁾は、臼谷ら⁴⁾が開発した融雪・流出モデルを対象に積雪分布を補正する手法を検討し、札幌市近郊の定山溪ダムに適用している。結果、補正を行うことにより毎年安定した精度で融雪期のダム流入量を計算できたこと、標高が高く森林以外の植

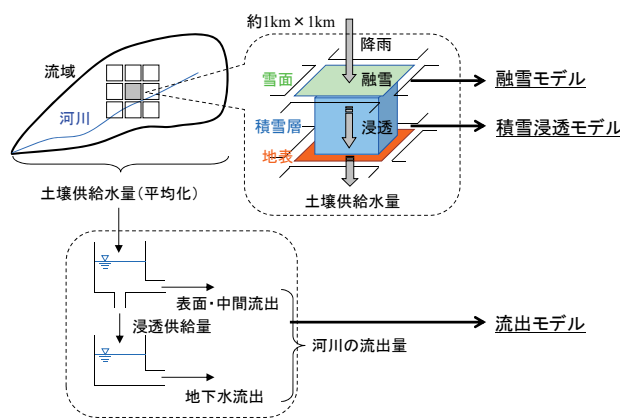


図-1 融雪・流出モデルの概要⁴⁾

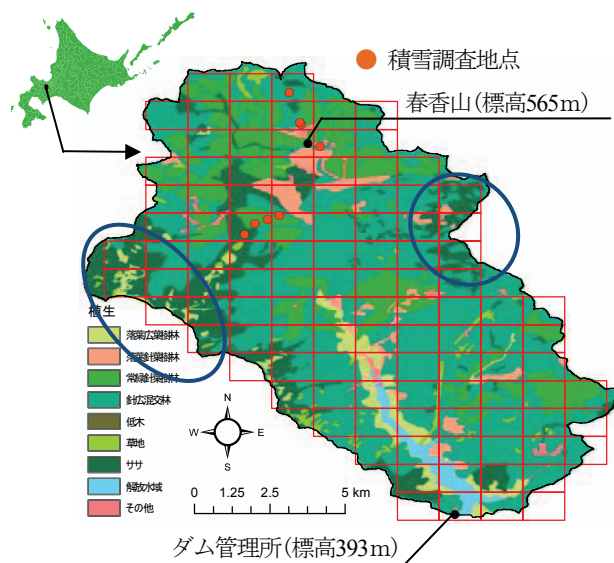


図-2 定山溪ダム流域とデータ観測点

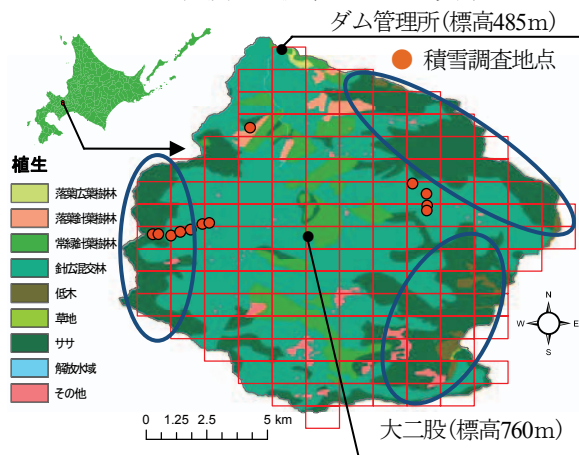


図-3 豊平峡ダム流域とデータ観測点

生の範囲の積雪量が適切に補正され、融雪後期の計算精度が改善されたことを報告している。

そこで本稿では、西原⁷⁾らの開発したモデルを、札幌市近郊の定山溪ダム及び豊平峡ダムの10融雪期に適用し、モデルの精度についてさらなる検証を行った。加えて、本モデルをダム管理の現場に適用することを視野に入れ、複数の積雪量のケースを同時に計算することで、より確実にダム流入量を精度良く計算する方法を開発した。

2. 融雪・流出モデルの概要

白谷ら⁴⁾が提案した融雪・流出モデルの概要を図-1に示す。図に示したように、本モデルは、融雪モデル、積雪浸透モデル、流出モデルで構成される。計算手順は、はじめに、融雪モデル及び積雪浸透モデルを約1km四方のメッシュに適用し、気象因子から土壌供給水量を推定する。次に、メッシュ毎の土壌供給水量を流域全体にわたってランピングし、この値を流出モデルに入力してダム流入量を求める。本モデルは、熱収支法を基本として植生の影響を考慮していること、融雪水が積雪内を浸透する時間を考慮していることが特徴である。

3. 対象流域と使用データ

対象流域は図-2及び図-3にそれぞれ示した定山溪ダム流域及び豊平峡ダム流域である。両ダムともに、豊平川流域の上流部に位置し、定山溪ダムは流域面積104km²、標高帯は300m付近～1,300m付近、豊平峡ダムは流域面積134km²、標高帯は400m付近～1,300m付近である。

図-2及び図-3には、環境省による自然環境保全基礎調査の結果を用い9分類した植生を示したが、両ダムとも流域の多くが森林である。しかし、図中の丸で囲んだ範囲のように、標高が高く、尾根に近い範囲では、草地やササといった森林以外の植生が主たる植生となる。

定山溪ダム流域では、図-2に示したダム管理所及び春香山の2地点で積雪深をテレメータで連続観測しており、積雪分布の補正にはこの2点の観測値を用いた。同様に豊平峡ダム流域では、図-3に示したダム管理所及び大二股の2地点で積雪深が観測されており、この観測値を用いて積雪分布を補正した。さらに、積雪相当水量分布の補正には、両ダム流域において毎年3月上旬に行われている積雪調査の結果を用いた。

また、流域の積雪分布の推定の際に必要な地形データは、国土地理院が公開している基盤地図情報の数値標高モデルを用いて求めた。

上記の他、融雪・流出モデルの入力データとして、ダム管理所において観測されている気象データを用いている。なお、豊平峡ダムにおいては、入力データとして必要である日照時間と日射量が観測されていないため、定山溪ダムにおいて観測されたデータを用いている。

4. 積雪分布を補正する方法

(1) 森林の内外の判定

本研究では、ダム流域を森林の内外に分けて、異なる方法で積雪分布を補正する。このためには、融雪・流出モデルの各メッシュについて、森林の内外を判定する必要がある。判定は、図-2及び図-3に示した植生分類を用いてメッシュ毎に森林植生、森林以外の植生の面積を求め、森林植生の面積の割合がメッシュの面積の60%を下回ったメッシュを森林外と扱うこととした⁷⁾。

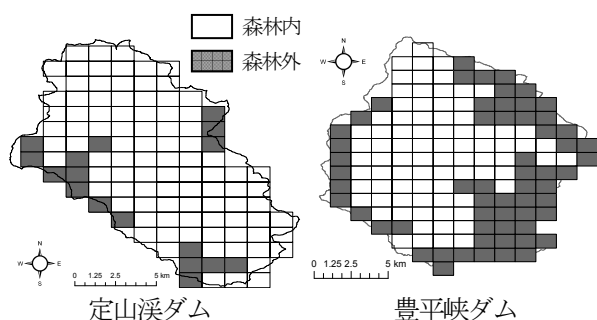


図-4 森林内外の判定結果

両ダム流域について、森林の内外を判定した結果を図-4に示す。図を見ると、図-2及び図-3に示した植生を反映し、標高が高く、尾根に沿った範囲にあるメッシュが森林外と判定されている。定山溪ダム流域では全111メッシュのうち17メッシュ、豊平峡ダム流域においては全142メッシュのうち60メッシュが森林外と判定された。

(2) 森林内の積雪深の補正方法

森林内メッシュの積雪深の補正には、西原ら⁵⁾が提案している地形考慮法を用いる。これは、標高、傾斜、曲率、斜面方位をパラメタとして積雪深を推定する方法であり、積雪深は式(1)で表される。

$$SD = a_1 x_{ele} + a_2 x_{slo} + a_3 x_{cur} + a_4 \cos(x_{asp} - 45) + a_5 \quad (1)$$

ここで、 SD ：積雪深(m)、 x_{ele} ：標高(m)、 x_{slo} ：傾斜(°)、 x_{cur} ：曲率、 x_{asp} ：斜面方位(°)、 $a_1 \sim a_5$ ：回帰係数である。5つの回帰係数は、両ダムともに、流域内の2箇所にてテレメータ観測している積雪深から求めることになるが、すべての回帰係数を求めることはできない。そこで、 $a_2 \sim a_4$ は航空レーザ測量結果を用いて求めた値を用い、固定値とした⁷⁾。具体的には、 $a_2 = -0.0154$ 、 $a_3 = 7.106$ 、 $a_4 = -0.0737$ である⁵⁾。 a_1 及び a_5 は、2つのテレメータ観測地点の標高及び積雪深を用いて、式(2)に示す直線式を作成した結果より決定した。

$$SD = a_1 x_{ele} + a_5 \quad (2)$$

(3) 森林外の積雪深の補正方法

森林外メッシュの積雪深の補正には、西原ら⁶⁾が提案している地上開度をパラメタに用いる手法を適用する。地上開度とは、着目する地点が周辺に比べて地上に突き出ている程度及び地下に食い込んでいる程度を数量化したものである。地上開度が90°以下の場合は着目地点が谷、90°以上の場合は尾根であることを示し、着目地点が平地である場合は地上開度が90°となる。

$$SD = b_1 \phi + b_2 \quad (3)$$

地上開度を用いると、森林外の積雪深は式(3)で表すことができる。ここで、 SD ：積雪深(m)、 ϕ ：地上開度(°)、 b_1 及び b_2 ：回帰係数である。回帰係数は、テレメータ観測した積雪深を用いて決定することが望ましいが、両ダム流域の観測点は、いずれも森林内に位置しているため、用いることができない。そこで、下記の方法を用いた⁷⁾。尾根には積雪がほとんど堆積できないため、地上開度100°の点で積雪深を0とする。次に、100mピッチの標高帯の面積に占める森林植生の面積の割合を求め、この割合が60%を下回った標高帯における、式(2)を用いた積雪深を地上開度80°の点における積雪深とする。この2点の積雪深を用いて式(3)を作成する。なお、標高帯の面積に占める森林植生の割合が60%を下回った標高帯は、定山溪ダム流域において900m-1000mである。豊平峡ダムにおいては標高800m-900mで60%を若干下回ったが、今回は近傍にある定山溪ダムにあわせて900m-1000mとした。

積雪深の補正は毎日行う。さらに、毎年の積雪調査が行われた日については、積雪相当水量の補正も行った。積雪相当水量の補正方法は、これまでに述べた積雪深の補正の考え方と同じである。

5. 結果と考察

(1) 定山溪ダム

計算は、2002年～2012年の10融雪期を対象とした。また、積雪分布の補正には、標高と積雪深（積雪相当水量）の線形関係を用いることが一般的であるため、比較対象として、この方法で補正した計算を併せて行った（以降、標高法と標記する）。

表-1にダム流入量の観測値を真値として求めた計算値のNash-Sutcliffe指標を示す。評価期間は各年の積雪調査日の翌日からモデルで計算された消雪日の前日（概ね毎年3月上旬頃から6月上旬頃）までである。なお、Nash-Sutcliffe指標は0.8程度を超えていれば精度が高いと判断される指標である。表を見ると、補正無しの場合でも比較的高い精度でダム流入量が計算されている。しかし、2005年や2008年のように計算精度が極端に低い年が存在する。標高法は、補正無しの場合と比較して若干精度が高いものの、極端に精度の低い年が見られる傾向は補正無しの場合と同じである。一方で、本手法の結果をみると、2008年の精度が若干低いものの、これ以外は0.8を超えており、毎年安定して高い精度でダム流入量が計算されている。次に、図-5に最も精度が高かった2006年融雪期のダム流入量を示す。2006年融雪期は図に示した3手法とも高い精度でダム流入量を計算しており、融雪前期から中期にかけては、手法間の計算結果にほとんど差が見られない。一方で、融雪後期では手法間で計算結果に大きな差が見られる。図-6の下には融雪後期の5/21から6/10の結果を拡大した図を示したが、補正無しの場合はダム流入量を過小評価、標高法は過大評価しているのに対し、本手法は精度良く流入量を計算している。

表-1 Nash-Sutcliffe指標（定山溪ダム）

	本手法	補正無し	標高法
2003	0.84	0.79	0.86
2004	0.85	0.84	0.77
2005	0.80	0.36	0.81
2006	0.92	0.86	0.92
2007	0.85	0.81	0.82
2008	0.54	-0.39	0.06
2009	0.88	0.60	0.82
2010	0.86	0.86	0.75
2011	0.81	0.78	0.77
2012	0.86	0.87	0.85
平均	0.82	0.64	0.74

※評価期間：積雪調査翌日から消雪前日まで

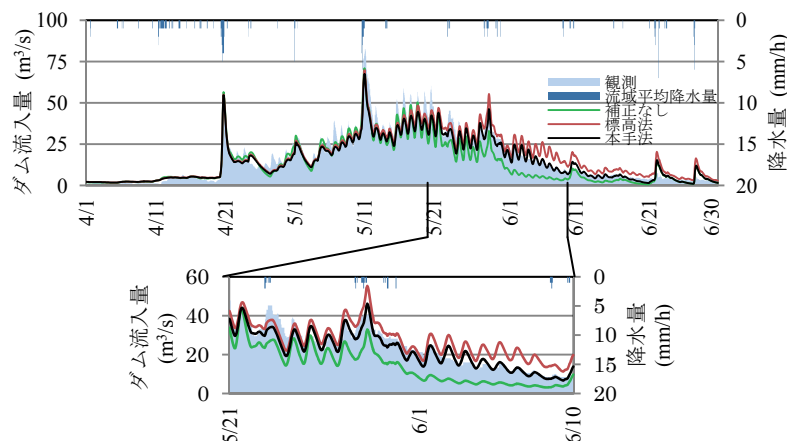


図-5 ダム流入量（定山溪ダム・2006年融雪期）

表-2 融雪後期の誤差指標（定山溪ダム） ※評価期間：融雪期の最大流入量記録時刻から消雪前日まで

	Nash-Sutcliffe指標			相対誤差			流出ボリューム誤差		
	本手法	補正無し	標高法	本手法	補正無し	標高法	本手法	補正無し	標高法
2003	0.68	0.36	0.78	0.28	0.40	0.25	0.11	0.32	-0.07
2004	0.72	0.59	0.49	0.29	0.37	0.46	-0.16	0.27	-0.35
2005	0.27	-6.74	0.57	0.45	0.69	0.45	0.36	0.67	0.24
2006	0.90	0.67	0.90	0.18	0.38	0.40	0.11	0.30	-0.09
2007	0.70	0.13	0.61	0.26	0.53	0.35	-0.14	0.44	-0.28
2008	0.03	-1.83	-0.78	0.33	0.64	0.41	-0.05	-0.68	-0.34
2009	0.82	0.35	0.75	0.24	0.61	0.31	-0.08	-0.47	-0.26
2010	0.79	0.68	0.52	0.24	0.35	0.54	-0.15	0.21	-0.38
2011	0.66	0.61	0.66	0.24	0.32	0.28	-0.12	0.18	-0.23
2012	0.94	0.83	0.96	0.26	0.47	0.22	0.15	0.35	-0.03
平均	0.65	-0.43	0.54	0.28	0.47	0.37	0.14	0.39	0.23

※流出ボリューム誤差の平均値は各年の値の絶対値の平均値

融雪後期の計算精度について評価するため、各年の融雪期の最大流入量記録時刻（例えば図-5に示した2006年は5月11日6:00）からモデルで計算された消雪日の前日までの誤差指標⁴⁾を表-2に示す。ここで、相対誤差は各時刻における相対誤差の絶対値の平均値、流出ボリューム誤差は、対象期間における観測流量の合計値を真値とした場合の、モデルにより計算された流量の合計値との間の相対誤差である。流出ボリューム誤差は、計算流量が過大の場合に負、過小の場合に正の値となる。なお、各年の融雪期における最大流入量は、4月下旬から5月上旬の間に記録されている。

表-2を見ると、Nash-Sutcliffe指標において2005年及び2008年といった精度の低い年がみられるものの、本手法による結果は概ね0.6から0.7程度となっており、一定の精度で融雪後期のダム流入量を計算できていることがわかる。また、3指標を概観すると、本手法は補正しなかった場合の精度をすべて上回っている。本手法と標高法を比較すると、標高法の精度が若干高い年があるものの、安定して一定の精度でダム流入量を計算している点では、本手法の方が優位であると考えられる。

最後に流出ボリューム誤差を見ると、標高法では2005年を除いたすべての年で負となっており、流出ボリュームを過大評価する傾向が見られる。この要因として次の

ことが考えられる。融雪後期においては、流域内の低・中標高帯の融雪がほぼ終了しており、融雪の中心は高標高帯であるが、標高法の場合、標高が高いほど積雪量が多くなるように補正がなされる。しかしながら、図-2に示したように標高の高い範囲では、尾根沿い等にササや草地といった森林以外の植生が多く分布しており、このような範囲では、積雪が風に飛ばされやすく実際には積雪量がそれほど多くなっていないことが考えられる⁵⁾。

確認のため、2006年融雪期を例として、融雪中期から後期にかけての雪面融雪量の時間変化を図-6に示す。図の上段は、図-4に示した森林内のメッシュの単位面積当たりの平均積雪表面融雪量、下段は同じく図-4に示した森林外のメッシュの平均積雪表面融雪量である。上段の図は主に流域内の低・中標高帯で森林内における融雪の傾向、下段の図は主に流域内の高標高帯における森林外の融雪の傾向を捉えていると考える。

上段に示した森林内の雪面融雪量を見ると、5月中旬頃までは、3手法ともほぼ同様の傾向を示しており、これ以降、標高法、本手法、補正無しの順に融雪量が小さい状態となる。その後、6月中旬頃にはほぼ融雪が終了している。また、下段の森林外の雪面融雪量を見ると、5月下旬頃までは、3手法ともほぼ同様の傾向を示しており、これ以降、標高法、本手法、補正無しの順に融雪量

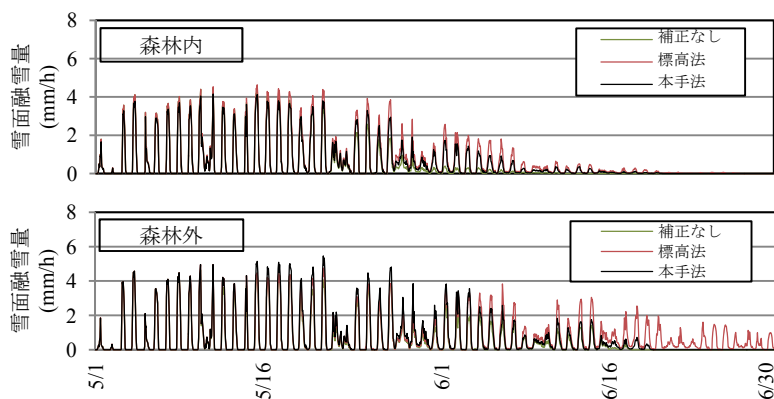


図-6 積雪表面融雪量（定山溪ダム・2006年融雪期）

が大きい状態となる。以上のことが、図-5に示したダム流入量の計算値が、5月上旬以降に標高法、本手法、補正無しの順に小さくなった原因と考えられる。また、ダム流入量の計算精度の高さから類推すると、森林外において地上開度を採用した本手法が最も適切に積雪分布を再現しているものと考えられる。また、標高法では7月に入っても融雪が終了おらず、このことにより融雪後期の計算流量が過大評価されていると考える。融雪後期はダムの貯水率が概ね95%を超えており、融雪流入量を貯留するか放流するか判断が難しい。本手法は、融雪後期の計算精度が高いため、融雪後期のダム管理に非常に有用であると考えられる。

(2) 豊平峡ダム

2002年～2012年の10融雪期について、豊平峡ダムのダム流入量を計算した結果から求めたNash-Sutcliffe指標を表-3に示す。豊平峡ダムは、薄別ダムからの流域外流入があるため、これを考慮している。なお、2004年融雪期は観測データに長期の欠測があったことから検討対象外とする。表-3のNash-Sutcliffe指標を見ると、定山溪ダムとは異なり、豊平峡ダムに対しては、本手法による計算精度の改善効果が大きくなく、標高法の精度が高い結果となった。豊平峡ダムについては、定山溪ダムと比較して積雪調査結果を用いて求めた積雪包蔵水量の推定精度が低いことが報告されており⁸⁾、このことが一つの要因と考えられる。また、(1)節の結果を踏まえると、標高法の精度が高いことから、本手法は流域の積雪量を過小評価している可能性が考えられる。

試みに、本手法を対象に、毎年の積雪調査日に積雪相当水量を補正する際、4章に示した補正方法により求められた数値を、全メッシュ一律に0.75倍、1.25倍、1.5倍した4ケースの計算を行った。結果を表-4に示す。表にはNash-Sutcliffe指標が最も高かった倍率の結果を示している。結果を見ると、2008年を除いてNash-Sutcliffe指標が0.7程度を超えており、比較的高い精度でダム流入量を計算している。このことは、本手法を用いて積雪量を変化させた複数の計算を行えば、そのうちのどれか

表-3 Nash-Sutcliffe指標（豊平峡ダム）

	本手法	補正無し	標高法
2003	0.77	0.64	0.80
2004	-	-	-
2005	0.74	0.68	0.85
2006	0.49	0.37	0.57
2007	0.61	0.46	0.74
2008	0.42	0.43	0.56
2009	0.68	0.49	0.70
2010	0.69	0.52	0.77
2011	0.68	0.64	0.54
2012	0.87	0.84	0.88
平均	0.66	0.56	0.71

※評価期間：積雪調査翌日から消雪前日まで

は高い精度でダム流入量を予測する可能性があることを示している。十分な計算資源を有している現在であれば、複数の予測計算を同時に行い、このうち観測流量を最も良く再現しているケースを参照しながら、ダム管理を行うことが可能であると考えられる。

図-7には最もNash-Sutcliffe指標が高い2012年融雪期の流入量を示した。複数の計算を同時に行った場合、ダム管理の際にどのケースを見るべきか判断しづらいことが考えられる。2012年は倍率1.25倍の精度が最も高い年であったが、図を見ると、倍率1.5倍のように、積雪量が過大評価されているケースではダム流入量の日変動が大きく、流入量が過大評価されて推移している。一方で、倍率0.75倍及び1.0倍のように、積雪量が過小評価されているケースでは、流入量の日変動が小さく、流入量が過小評価されて推移する。さらに、積雪が無くなった時点で流出量の日変動が無くなる。このような融雪期の流入量の傾向を把握しておけば、適切なケースの計算流量を参照しながら、ダム管理を行うことは比較的容易と考えられる。さらに、実際のダム管理では、24時間後までにモデル等により予想されたダム流入量を機械的に上下させ、複数の流入量を想定してケーススタディを行っているが、このケーススタディに本手法による複数の計算結果を用いることも可能である。

最後に、融雪後期の計算精度を確認するため、表-5に各年の融雪期の最大流入量記録時刻からモデルで計算された消雪日の前日までのダム流入量の誤差指標を示す。本手法の結果は、表-4に示した最も精度の高かった倍率による結果を表示している。補正無しの場合と比較すると、本手法により精度が改善されている。本手法と標高法を比較すると、Nash-Sutcliffe指標で評価した場合は標高法、相対誤差及び流出ボリュームで評価した場合は本手法の精度が高い結果となっており、一概に本手法の精度が高いとは言えない。しかし、森林内外の判別方法や、積雪量の補正倍率の設定方法をより詳細に検討することにより、融雪後期の計算精度がさらに改善する可能性があり、これは今後の課題である。

表-4 誤差指標（豊平峡ダム）

	本手法	流出 ボリューム誤差	倍 率
2003	0.83	0.02	1.25
2004	-	-	-
2005	0.87	-0.04	1.5
2006	0.87	0.17	0.75
2007	0.80	-0.14	1.5
2008	0.42	-0.30	1.0
2009	0.73	-0.12	1.25
2010	0.84	-0.02	1.5
2011	0.68	-0.19	1.0
2012	0.88	-0.05	1.25
平均	0.77	0.12	

※評価期間：積雪調査翌日から消雪前日まで

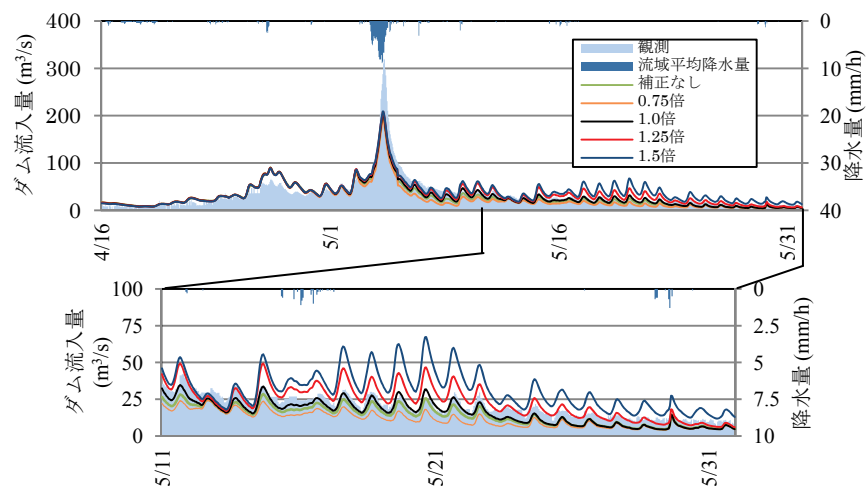


図-7 ダム流入量（豊平峡ダム・2012年融雪期）

表-5 融雪後期の誤差指標（豊平峡ダム）

※評価期間：融雪期の最大流入量記録時刻から消雪前日まで

	Nash-Sutcliffe指標			相対誤差			流出ボリューム誤差		
	本手法	補正無し	標高法	本手法	補正無し	標高法	本手法	補正無し	標高法
2003	0.05	-1.02	0.55	0.20	0.42	0.28	0.04	0.39	0.11
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	0.09	-2.01	0.23	0.19	0.44	0.27	-0.02	0.41	0.27
2006	-0.17	-0.96	-0.13	0.25	0.55	0.45	0.21	0.51	0.28
2007	0.80	-0.48	0.65	0.23	0.73	0.35	0.12	0.64	0.30
2008	0.33	0.53	0.65	0.17	0.30	0.32	-0.01	0.19	-0.10
2009	-0.08	-2.62	0.62	0.23	0.47	0.26	-0.03	0.43	0.05
2010	0.64	0.04	0.55	0.32	0.52	0.44	0.30	0.52	0.39
2011	0.20	0.61	0.32	0.23	0.22	0.22	0.03	0.03	-0.15
2012	0.90	0.83	0.91	0.23	0.34	0.27	0.00	0.31	-0.02
平均	0.31	-0.56	0.48	0.23	0.44	0.32	0.12	0.38	0.13

※流出ボリューム誤差の平均値は各年の値の絶対値の平均値

6. まとめ

本稿で得られた結果を以下に示す。

- 1) 森林の内外の積雪分布の特徴を反映し、観測値を用いて積雪分布を補正する融雪流出モデルの精度を検証した。さらに、現場への適用を考え、確実にダム流入量を精度良く計算する手法を開発した。
- 2) 定山溪ダムの融雪期のダム流入量を計算した結果、高い精度で流入量を計算できた。特に、融雪後期における計算精度が向上した。
- 3) 豊平峡ダムについては、複数の倍率で積雪量を増減させたケースを同時に計算することにより、精度よくダム流入量を計算できる可能性が高まることを示した。

謝辞：国土交通省豊平川ダム統合管理事務所にデータを提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中津川誠，星清：融雪期に豪雨が相俟って生起する出水の予測について：河川技術に関する論文集，第7巻，pp.453-458，2001。
- 2) 陸旻皎，小池俊雄，早川典生：アメダスデータと数値地理情報を用いた分布型融雪解析システムの開発，水工学論文集，第42巻，pp.121-126，1998。
- 3) 中山恵介，伊藤哲，藤田睦博，斉藤大作：融雪を考慮した山地流出モデルに関する研究：土木学会論文集，No.691/II-57，pp.25-41，2001。
- 4) 臼谷友秀，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，第20巻，第2号，pp.93-104，2007。
- 5) 西原照雅，中津川誠，浜本聡：航空レーザ測量を活用したダム流域の積雪深分布の推定，河川技術論文集第18巻，pp.465-470，2012。
- 6) 西原照雅，中津川誠：航空レーザ測量を活用した森林外の積雪相当水量分布の推定，土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, I_409-I_414, 2013。
- 7) 西原照雅，中津川誠，臼谷友秀：観測値を用いて融雪・流出モデルの積雪分布を補正する試み，平成25年度土木学会北海道支部論文報告集，第70巻，B-47，2013。
- 8) 西原照雅，中津川誠：航空レーザ測量を活用したダム流域の積雪包蔵水量の推定，水文・水資源学会2012年度研究発表会要旨集，pp.10-11，2012。

(2014. 4. 3受付)