

積雪・融雪状況に適応した寒冷地ダムの流水管理に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地水圏研究グループ（水環境）

研究担当者：渡邊和好，西原照雅，水垣滋，柏谷和久

【要旨】

航空レーザ測量結果を用いて山間部における積雪分布と地形との関係を分析した結果、森林の内外部で積雪分布の特徴が異なること、森林内では標高、森林外（例えば、森林限界以上の標高帯）では地形の凹凸が積雪深に与える影響が大きいことがわかった。このような積雪分布の特徴を考慮し、積雪調査の結果を用いて積雪分布を補正する機能を組み込んだ融雪・流出モデルを開発した。本モデルを北海道内の複数のダムに適用した結果、融雪期におけるダム流入量の計算精度が向上した。特に、融雪中期から後期における計算精度の向上が顕著であった。

キーワード：融雪流出，ダム，積雪分布，森林，高標高帯，地上開度

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壤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、森林の内外部に分けて、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部に分けて、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

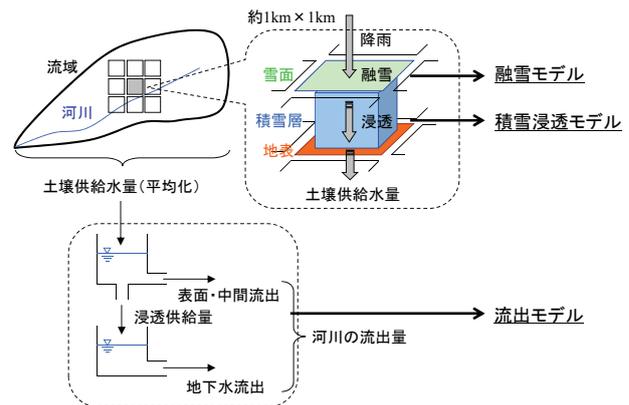


図-1 融雪・流出モデルの概要⁴⁾

案している。

北海道のダム流域では、毎年3月に積雪調査を行い、積雪深及び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。これにより、融雪・流出モデルの計算精度が向上する可能性がある。そこで本研究では、臼谷ら⁴⁾が提案した融雪・流出モデルを対象に、積雪分布を補正する機能を組み込み、北海道内の複数のダムに適用してモデルの精度を検証した。

2. 融雪・流出モデルの概要

臼谷ら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及び融雪水が積雪内に浸透する時間を考慮している。また，ダム流域内で観測されている気象データのみで流入量を計算できること，集中型モデルであるため，計算負荷が小さいといった特徴がある。

3. 対象流域と使用データ

対象流域は図-2 から図-4 にそれぞれ示した忠別ダム流域，豊平峡ダム流域及び定山溪ダム流域である。このうち，忠別ダムは忠別川の上流部に位置し，流域面積239km²，標高帯は400m～2,300mである。豊平峡ダム及び定山溪ダムは豊平川流域の上流部に位置し，豊平峡ダムは流域面積134km²，標高帯は400m付近～1,300m付近，定山溪ダムは流域面積104km²，標高帯は300m付近～1,300m付近である。図-2 から図-4 は，環境省による自然環境保全基礎調査の結果を用い10分類した植生を示している。忠別ダム流域では，白線で示した標高1,400m付近に森林限界があり，ここを境に植生が森林から森林以外に変化する。一方，豊平峡ダム及び定山溪ダムは，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。

いずれのダムにおいても，毎年3月に積雪調査が行われているため，この結果を用いて，流域の積雪深分布及び積雪相当水量分布を補正する。

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，日照時間及び日射量を観測していないため，近接する定山溪ダムにおける観測データを用いている。

4. 積雪分布を補正する方法

4.1 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

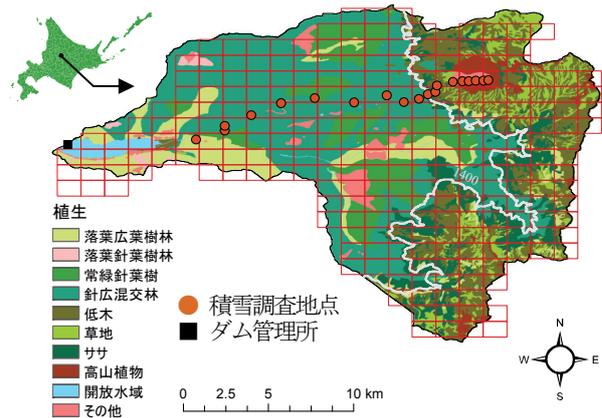


図-2 忠別ダム流域と積雪調査地点

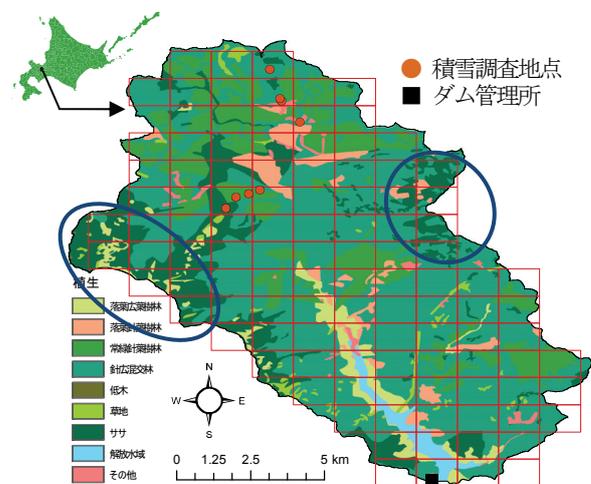


図-3 定山溪ダム流域と積雪調査地点

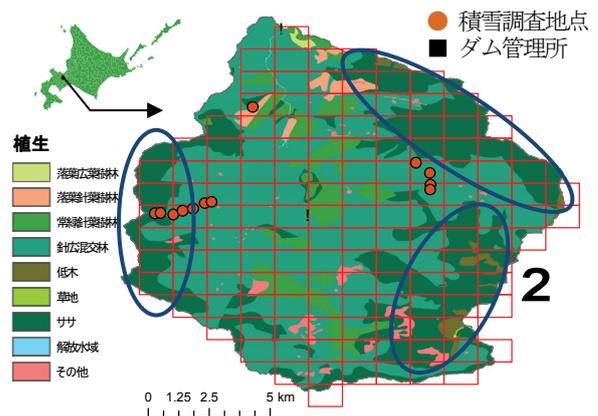


図-4 豊平峡ダム流域と積雪調査地点

要がある。判定は，図-2 から図-4 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⁾。

各ダム流域について，森林の内外を判定した結果を図-5に示す。図を見ると，図-2 から図-4 に示した植生を

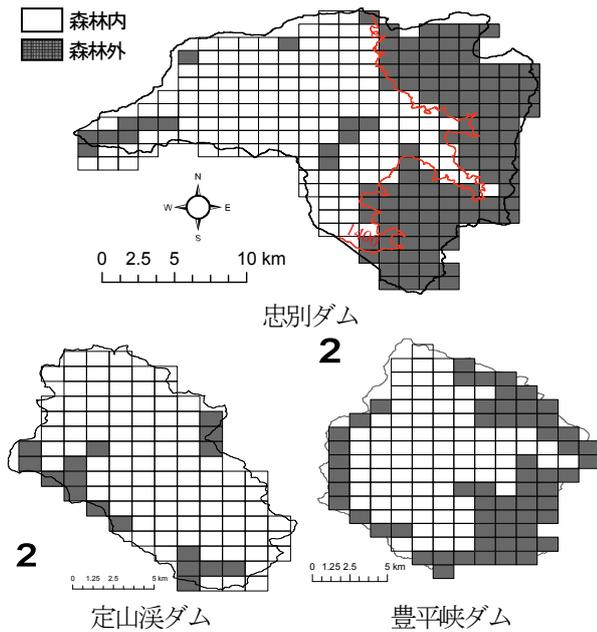


図-5 森林内外の判定結果

反映し、忠別ダムにおいては、森林限界である標高1,400mを境に、低標高帯側は概ね森林内、高標高帯側は概ね森林外と判定されている。また、定山溪ダム及び豊平峡ダムにおいては、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。忠別ダム流域においては全259メッシュのうち120メッシュ、定山溪ダム流域においては全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。

4.2 森林内の積雪分布の補正方法

森林内メッシュの積雪深の補正には、西原ら⁹⁾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、斜面方位をパラメー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。

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

ここで、 SD_f ：森林内メッシュの積雪深(m)、 x_{ele} ：メッシュの標高(m)、 x_{slo} ：メッシュの傾斜(°)、 x_{cur} ：メッシュの曲率、 x_{asp} ：メッシュの斜面方位(°)、 $a_1 \sim a_5$ ：回帰係数である。5つの回帰係数は、各流域において実施された積雪調査の結果から求めることになるが、調査地点数が少ないため、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。具体的には、 $a_2 = -0.0154$ 、 $a_3 = 7.106$ 、 $a_4 = -0.0737$ である⁹⁾。 a_1 及び a_5 は、積雪調査地点の標高及び積雪深を用いて、式(2)に示す直線回帰式を作成した結果より決定した。

$$SD_{obs} = a_1 H + a_5 \quad (2)$$

ここで、 SD_{obs} ：積雪調査地点の積雪深(m)、 H ：同地点の標高(m)である。

積雪相当水量を求める場合は、積雪密度が必要となる。過去に行われた積雪調査の結果を見ると、森林内においては、積雪調査が行われる時期の積雪密度は、流域全域でほぼ一定である⁸⁾。このため、積雪深に対する式(1)及び式(2)の関係は、積雪相当水量に対しても適用できると考えた。具体的には、式(1)の SD_f を SWE_f ：森林内の積雪相当水量(mm)に、式(2)の SD_{obs} を SWE_{obs} ：積雪調査地点の積雪相当水量(mm)に置き換えて、各メッシュの積雪相当水量を計算する。

積雪深及び積雪相当水量の補正は、毎年の積雪調査日に行う。

4.3 森林外の積雪分布の補正方法

森林外メッシュの積雪深の補正には、西原ら⁹⁾が提案している地上開度をパラメータに用いる手法を適用する。地上開度とは、着目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⁹⁾。地上開度が90°以下の場合には着目地点が谷、90°以上の場合に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。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。

$$SD_{uf} = b_1 \Phi + b_2 \quad (3)$$

ここで、 SD_{uf} ：森林外メッシュの積雪深(m)、 Φ ：メッシュの無雪期の地上開度(°)、 b_1 及び b_2 ：回帰係数である。森林外の複数の地点において積雪調査が行われている場合は、積雪調査地点の地上開度と積雪深を用いて、回帰係数を決定する。

しかし、積雪調査地点の多くは森林内に位置しており、回帰係数を求めることができないケースが多い。そこで、忠別ダム流域の森林の内外両方を含む範囲で行われた航空レーザ測量の結果⁹⁾を分析し、森林外において積雪調査が行われていない場合に式(3)を作成する方法を検討した。図-6に標高と積雪深の関係を示す。航空レーザ測

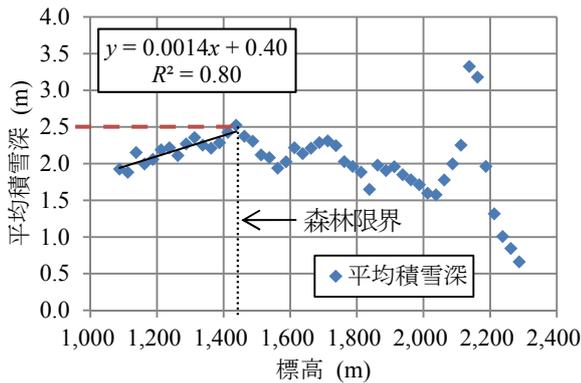
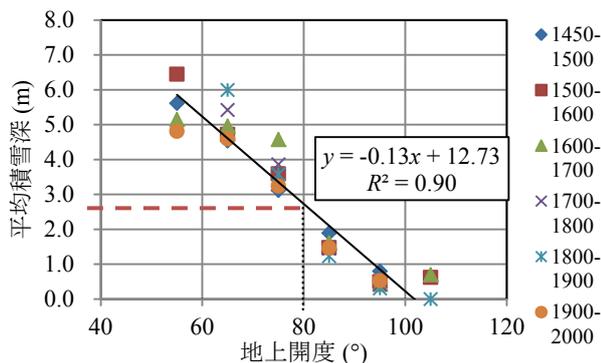
図-6 標高と積雪深の関係⁶⁾

図-7 地上開度と森林外の積雪深の関係

量を実施した範囲には、標高 1,450m 付近に森林限界があり、この標高までは、標高の増加とともに積雪深が線形に増加している。しかし、森林限界を超えると、積雪深の変動が大きくなり、森林内と比較して積雪深が小さい傾向が見られる。次に、森林限界以上の積雪深について、地上開度との関係を示したものが図-7 である。森林外では、地上開度が大きくなるにともない、積雪深が線形に減少していることがわかる。図-7 には、標高を 100m ピッチに区切り、積雪深と地上開度との関係を示したが、標高による差異はほとんど見られない。さて、積雪深の補正には、直線である式(3)を用いるため、最低 2 点の地上開度に対し積雪深を決定しなければならない。この 2 点は、図-6 及び図-7 を分析した結果から、以下のように決定した。

はじめに、地上開度が 90°以上の尾根である。尾根は風により積雪が移動しやすい地形であると同時に、積雪が再堆積しにくい地形であるため、図-7 において、地上開度 100°付近で積雪深が 0 となっている。このことから、地上開度 100°の点で積雪深を 0 とする。残り 1 点は、直線の精度を確保するため、地上開度が 90°以下の範囲から選定することとする。山間部においては、森林内の積雪深は標高の増加とともに線形に増加すること、森林外の積雪深は森林内と比較して小さくなることを考慮する

と、ある範囲の積雪深を考えた場合、積雪深のピークは、植生が森林の範囲において標高が最も高い地点に出現すると考えられる。図-6 を見ると、航空レーザ測量を実施した範囲では、標高 1,450m の積雪深 2.5m がこれに対応する。この積雪深が 2.5m の点は、図-7 において、地上開度 80°付近に対応する。残り 1 点の決定には、この関係を用いることとした。具体的には、はじめに図-2 から図-4 に示した植生分類を用いて 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る。この割合が初めて 60%を下回った標高帯を森林の範囲において標高が最も高い地点と考え、この標高帯において式(2)を用いて積雪深を計算する。ここで求めた積雪深を、地上開度が 80°の点における積雪深とした。以上のように計算した地上開度が 0°及び 100°における積雪深を用い、式(3)を作成する。

積雪相当水量は、式(3)の積雪深 SD_{uf} を積雪相当水量 SWE_{uf} に置き換えた式(4)を用いた⁶⁾。

$$SWE_{uf} = c_1 \Phi + c_2 \quad (4)$$

ここで、 SWE_{uf} : 森林外メッシュの積雪相当水量(mm)、 c_1 及び c_2 : 回帰係数である。森林外の複数の地点において積雪調査が行われている場合は、積雪調査地点の地上開度と積雪相当水量を用いて、回帰係数を決定する。森林外において積雪調査が行われていない場合の計算方法は、積雪深の場合と同じである。

積雪深及び積雪相当水量の補正は、毎年の積雪調査日に行う。

4. 4 積雪に作用させる倍率

前節までに示した方法を用いると、積雪調査日における各メッシュの積雪深及び積雪相当水量は一意的に求まる。しかし、毎年の気象状況等により計算精度が異なり、計算精度が低い年がある。例えば、鳥谷部ら¹⁰⁾は北海道内の 8 つのダムを対象に、積雪調査結果を用いて推定した積雪包蔵水量と融雪期における水収支を比較した結果、精度の良いダムにおいても 20%程度の誤差があったことを報告している。積雪調査日における積雪量の補正は、融雪開始時における積雪分布の初期状態を設定することに相当するため、この精度が低い場合、融雪期全体のダム流入量の計算精度を低下させる。このような精度低下を回避するための試みとして、補正した積雪深及び積雪相当水量に対し、全メッシュ一律に 1.25、0.75 といった倍率を乗じたケースの計算を併せて行った。

表-1 ダム流入量の計算誤差 (忠別ダム)

	Nash-Sutcliffe 指標		相対誤差		流出ボリューム誤差		本手法の倍率
	本手法	補正無し	本手法	補正無し	本手法	補正無し	
2008	0.67	-0.65	0.26	0.72	-0.04	-0.51	1.0
2009	0.71	-0.01	0.23	0.44	0.03	-0.34	1.0
2010	0.79	0.13	0.22	0.48	0.06	-0.27	0.75
2011	0.90	0.50	0.21	0.40	-0.02	-0.26	0.5
2012	0.35	-0.80	0.34	0.80	0.07	-0.38	0.5
平均	0.68	-0.17	0.25	0.57	0.05	0.35	-

※流出ボリュームの平均は、各年の絶対値の平均値である。

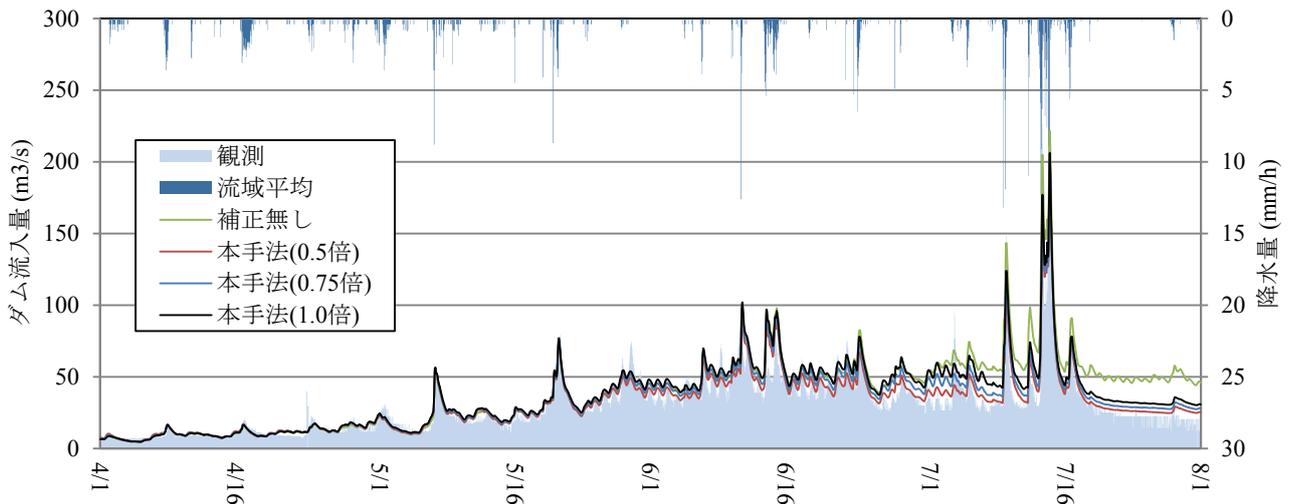


図-8 ダム流入量 (忠別ダム・2011年融雪期)

5. 忠別ダムへの適用結果

忠別ダム流域においては、図-4に示したとおり、8点の積雪調査地点が森林外に位置している。このため、式(3)及び式(4)を直接使い、積雪深及び積雪相当水量を補正することができる。また、ダム流入量を過大に計算する傾向があったことから、積雪に作用させる倍率は、0.75及び0.5とした。

計算は2008年～2012年の5融雪期を対象とした。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、相対誤差及び流出ボリューム誤差を示す⁴⁾。なお、本手法の欄には最もNash-Sutcliffe指標が高い結果が得られた倍率(4.4節参照)による結果を示す。評価期間は積雪調査日の翌日からモデルにより計算された消雪日の前日(概ね3月中旬から7月)である。Nash-Sutcliffe指標は0.8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、補正無しの場合と比較して、本手法の精度が高く、積雪分布の補正の効果が現れている。本手法は、精度の低い年があるものの、比較的精度良くダム流入量を計算できていると考える。また、流出ボリューム誤差は、負の場合に計算流量が過大であることを示す指標であるが、補正無しの場合には、30%

程度過大となっているのに対し、本手法の結果は、0に近く、流出のボリュームの計算精度が向上している。これは、本手法を用いた積雪分布の補正により、融雪開始時の積雪包蔵水量の計算精度が向上したことを示していると考えられる。さらに、倍率をみると、2010年～2012年のように、倍率を作用させた場合の精度が最も良い年が存在する。倍率を作用させなかった場合、Nash-Sutcliffe指標が最大で0.3程度低下しており、倍率を用いて複数のケースを同時に計算することにより、計算精度の低下を回避できることが確認された。

図-8には、本手法のNash-Sutcliffe指標が最も高い2011年融雪期を例として、ダム流入量を示した。赤線で示した0.5を作用させたケースのNash-Sutcliffe指標が最も大きい。図を見ると、融雪初期から6月中旬までは、補正無しの場合と本手法との間に大きな差は見られない。この時期は、流域の低標高帯から中標高帯が融雪の中心であることから、補正をしない場合、つまり熱収支法を用いた場合でも、この標高帯の積雪分布を精度良く計算できることを示していると考えられる。一方、6月中旬以降は、本手法がダム流入量を精度良く計算しているのに対し、補正無しの場合には過大となっている。この時期の

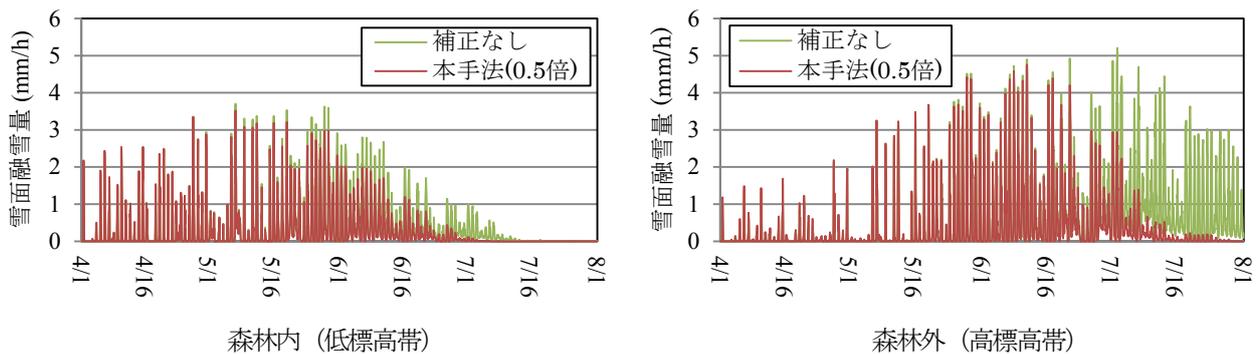


図-9 雪面融雪量 (忠別ダム・2011年融雪期)

融雪の中心は中から高標高帯であることから、森林外における積雪分布の補正の効果が現れていると考えられる。また、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参照するべきか判断しづらいことが考えられる。2011年は倍率0.5を作用させた場合の精度が最も高い年であったが、図を見ると、積雪量が過大である場合は、ダム流入量の日変動が大きくなり、流入量が過大計算されて推移している。一方で、積雪量が過小である場合は、流入量の日変動が小さくなり、流入量が過小計算されて推移している。さらに、積雪が無くなった時点で融雪が終了し、流入量の日変動が無くなる。このような融雪期の流入量の特徴を把握しておけば、適切なケースの計算値を参照しながら、ダム管理を行うことは比較的容易と考えられる。また、本モデルは計算負荷が小さいことから、十分な計算資源を有している現在であれば、ダム管理の現場において複数の計算を同時に行うことが可能である。

図-9には、森林内と森林外メッシュのそれぞれの、単位面積当たりの平均雪面融雪量を示した。左図の森林内の雪面融雪量を見ると、補正無しの場合と本手法の間に大きな差は見られない。一方で、右図の森林外の雪面融雪量を見ると、補正無しの場合は6月中旬以降の融雪量が大きく、7月末時点でも融雪が終了していないといった大きな違いが見られる。このことが、融雪中から後期に補正無しの場合の計算結果が過大となった要因と考えられる。熱収支法を用いて積雪の計算を行う場合、降水もしくは降雪分布から積雪深(積雪相当水量)を計算する。一般的に、山間部では標高が高くなるに伴い、降水量が多くなる傾向があるため、熱収支法を用いた場合、この傾向がそのまま積雪分布に反映されることとなる。しかし、森林限界以上の高標高帯に堆積した積雪は風により移動しやすい。このため、森林外においては、積雪は降雪地点から移動し、積雪の多寡は地形の凹凸に影響されるようになる(図-7)。このため、融雪開始時に初期

状態として設定する積雪分布は、風の影響を受けた後の再堆積分が適切と考えられる。地上開度を用いて積雪を補正すると、再堆積分布の特徴が反映されるため、この補正は、降雪分布が反映された積雪分布を再堆積分布に補正していることに相当すると考えられる。このことにより、高標高帯における積雪分布が適切に補正され、特に中から融雪後期のダム流入量の計算精度向上に寄与したことが推察される。融雪後期はダムの貯水率が概ね80%を超えており、ダムへの流入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、融雪期のダム管理に非常に有用であると考えられる。

6. 定山溪ダムへの適用結果

定山溪ダム流域においては、森林外の範囲で積雪調査が行われていない。標高帯の面積に占める森林植生の割合は標高帯が900m-1000mにおいて60%を下回ったため、標高950mにおける積雪深及び積雪相当水量を地上開度80°における値として、式(3)及び式(4)を作成した。積雪分布の補正には、積雪調査の結果を用いて標高と積雪深(積雪相当水量)との間の線形の関係式を作成し、この関係を用いて補正することが一般的であるため、比較対象として、この方法により積雪分布を補正した計算を併せて行った(以降、標高法と表記する)。

2002年～2012年の10融雪期について、定山溪ダムのダム流入量を計算した結果から求めたNash-Sutcliffe指標、相対誤差及び流出ボリューム誤差を表-2に示す。評価期間は各年の積雪調査日の翌日からモデルにより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。表-2を見ると、どの指標についても本手法の精度が平均的に高い。また、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ものの、2005年や2008年のように計算精度が極端に低い年が存在し、精度が安定していない。本手法及び標高法の精度は安定して高く、積雪調査の結果を用いて積雪分布を補正した

表-2 ダム流入量の計算誤差 (定山溪ダム)

	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	0.85	0.80	0.85	0.54	0.59	0.52	0.08	0.14	-0.04
2004	0.75	0.64	0.73	0.27	0.34	0.30	0.21	0.35	0.13
2005	0.70	0.25	0.76	0.68	0.82	0.63	0.15	0.31	0.09
2006	0.94	0.86	0.83	0.28	0.40	0.35	0.06	0.21	-0.03
2007	0.88	0.91	0.84	0.71	0.69	0.73	-0.21	-0.12	-0.26
2008	0.40	-0.24	0.20	0.68	0.73	0.65	-0.34	-0.62	-0.45
2009	0.85	0.58	0.78	0.43	0.60	0.48	-0.13	-0.37	-0.26
2010	0.83	0.87	0.72	0.43	0.47	0.56	-0.19	0.06	-0.29
2011	0.81	0.81	0.76	0.62	0.74	0.60	-0.20	-0.00	-0.28
2012	0.92	0.90	0.91	0.53	0.60	0.51	0.00	0.07	-0.10
平均	0.79	0.63	0.75	0.52	0.60	0.53	0.16	0.23	0.19

※流出ボリュームの平均は、各年の絶対値の平均値である。

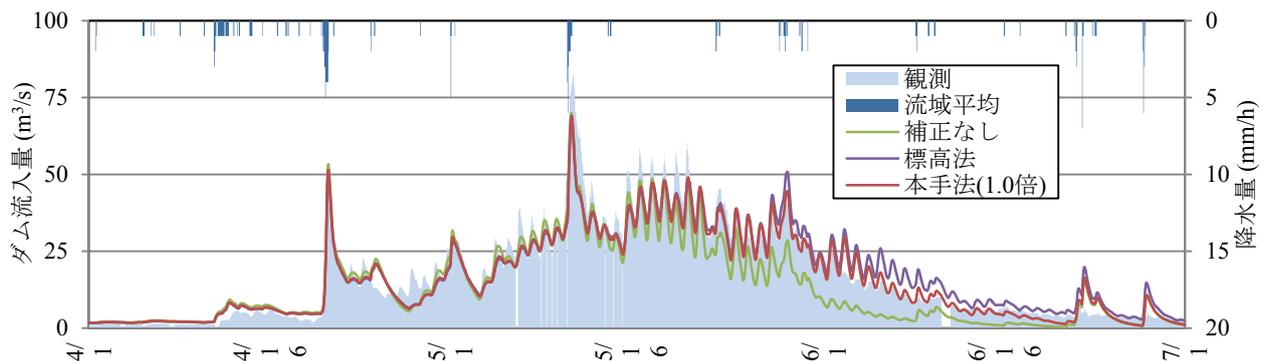


図-10 ダム流入量 (定山溪ダム・2006年融雪期)

効果が現れている。次に、流出ボリューム誤差を見ると、標高法では負になっている年が多く、ダム流入量を過大に計算する傾向が見られる。なお、定山溪ダムにおける計算の際、積雪に対して倍率を作用させたケースの計算は行っていない。定山溪ダムは、積雪調査結果を用いた積雪包蔵水量の推定精度が高い¹¹⁾ダムであり、倍率を作用させなくても積雪分布を精度良く補正できたと考えられる。

次に、図-10に本手法のNash-Sutcliffe指標が最も高い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、5月中旬にかけては、各手法の計算結果にほとんど差が見られない。一方で、5月中旬以降は、手法間で計算結果に見られる。融雪中期以降の計算結果に差が見られる点は、忠別ダムと同様である。具体的には、補正無しの場合はダム流入量を過小計算、標高法は過大計算しているのに対し、本手法は精度良く流入量を計算している。一般的に、標高が高くなるに伴い積雪量は増加するが、森林限界を超えると、風により積雪が飛ばされやすくなるため、積雪量は森林限界付近において頭打ちとなる(図-6)。しかし、標高法を用いた場合は、森林限界を超えた範囲に対しても、標高が高くなるに伴い積雪量が大きく補正される。このことが、標高法を用いた場合にダム流

入量を過大計算した要因と考えられる。一方で、本手法は森林内外に分けて積雪量を補正しているため、森林限界付近において積雪量が頭打ちになる性質が考慮される。さらに、森林外の積雪分布の特徴を踏まえ、地上開度を用いた補正を行っている。このことが本手法の計算精度が高い要因と考えられる。

7. 豊平峡ダムへの適用結果

豊平峡ダム流域においては、森林外の範囲で積雪調査が行われていない。標高帯の面積に占める森林植生の割合は標高帯が800m-900mにおいて60%を若干下回ったが、近傍に位置する定山溪ダム流域の例を考慮し、標高950mにおける積雪深及び積雪相当水量を地上開度80°における値として、式(3)及び式(4)を作成した。積雪に作用させる倍率は、0.75、1.25及び1.5とした。標高法による計算も併せて行った。

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。本手法の欄には最もNash-Sutcliffe指標が高い結果が得られた倍率による結果を示す。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。また、豊平峡ダムは、薄別ダムからの流域外流入が

表-3 ダム流入量の計算誤差 (豊平峡ダム)

	Nash-Sutcliffe 指標			相対誤差			流出ボリューム誤差			本手法の倍率
	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	0.80	0.65	0.80	0.35	0.46	0.36	-0.08	0.16	-0.03	1.25
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	0.90	0.68	0.85	0.28	0.38	0.32	-0.06	0.16	0.03	1.5
2006	0.82	0.45	0.69	0.28	0.39	0.33	0.01	0.30	0.14	1.5
2007	0.84	0.64	0.82	0.68	0.86	0.73	-0.25	0.05	-0.15	1.5
2008	0.49	0.46	0.52	0.65	0.67	0.67	-0.22	-0.23	-0.35	1.0
2009	0.71	0.64	0.67	0.55	0.59	0.52	-0.14	0.00	-0.21	1.0
2010	0.89	0.43	0.84	0.22	0.35	0.26	0.04	0.34	0.10	1.5
2011	0.69	0.65	0.67	0.29	0.32	0.28	-0.11	-0.05	-0.18	0.75
2012	0.93	0.89	0.93	0.44	0.41	0.43	0.01	0.23	0.01	1.25
平均	0.79	0.61	0.75	0.41	0.49	0.43	0.10	0.17	0.14	

※流出ボリュームの平均は、各年の絶対値の平均値である。

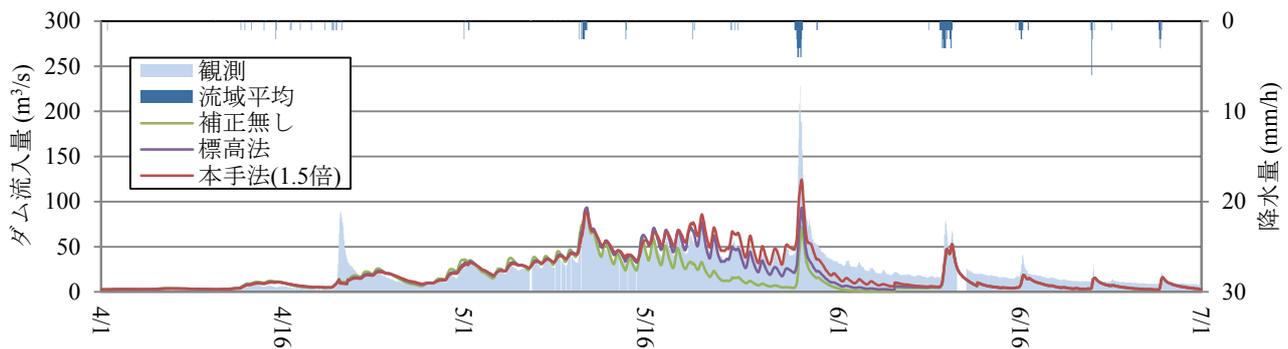


図-11 ダム流入量 (豊平峡ダム・2006年融雪期)

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評価の対象外とする。表-3を見ると、どの指標についても本手法の精度が平均的に高い。本手法及び標高法の精度は安定して高く、積雪調査の結果を用いて積雪分布を補正した効果が現れている。本手法及び標高法の精度は概ね同等であるが、2006年のように本手法の適用により大きく精度が向上した年が見られる。倍率をみると、倍率を作用させたケースの精度が最も良い年が存在しており、豊平峡ダムにおいても、倍率を作用させて複数のケースを同時に計算することにより、計算精度の低下を回避できることが確認された。また、流出ボリューム誤差を見ると、本手法の誤差が最も小さく、本手法を用いた積雪分布の補正により、融雪開始時の積雪包蔵水量の計算精度が向上していると考えられる。

図-11には、本手法の適用により、補正無しの場合と比較して最も Nash-Sutcliffe 指標が改善した 2006年融雪期を例として、ダム流入量を示した。図を見ると、融雪初期から5月中旬までは、補正無し、標高法、本手法との間に大きな差が見られず、標高の高い範囲が融雪の中心となる5月中旬以降の計算結果に差が現れている点は、忠別ダム及び定山溪ダムと同様である。5月中旬以降のダム流入量の計算結果から類推すると、この時期は流域

の中から高標高帯が融雪の中心であることから、いずれのケースにおいてもこの標高帯における積雪量を過小評価していること、過小評価の度合いが補正無し、標高法、本手法(1.5倍)の順に小さくなっていることが考えられる。定山溪ダムの計算結果を考察した際に述べたが、積雪量は森林限界付近の標高帯において頭打ちとなるため、積雪調査により標高と積雪量との関係が精度良く求められている場合、標高法を用いて積雪量を補正すると、積雪量が過大に補正され、結果としてダム流入量が過大に計算されるはずである。図-11がこのような結果となっていない要因として、積雪調査の結果より作成した積雪分布の推定式の精度が低いことが考えられる。この場合、積雪調査地点の見直しを行い、推定式の精度を上げることが必要と考えられるが、山間部は冬季の立ち入りが困難な場所が多く、見直しが困難な場合がある。このため、本手法のように、積雪調査結果から作成した式に対して倍率を作用させ、精度が低くなることを回避することは、現実的な対応の一つと考えられる。

最後に、本手法には、融雪・流出モデルの各メッシュの森林内外の判定方法、積雪調査が行われていない場合の森林外の積雪分布の推定方法、積雪に作用させる倍率といった、これまでの研究成果を踏まえて経験的に設定している点がある。ダム管理の現場に導入する際は、こ

これらの点について試行錯誤することにより、さらにダム流入量の計算精度をさらに高められる可能性がある。例えば、豊平峡ダムの 2006 年融雪期については、倍率を 1.75 とすることによって、Nash-Sutcliffe 指標 = 0.84 までダム流入量の計算精度を高めることが可能であった。

8. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 森林の内外の積雪分布の特徴を反映し、積雪調査結果を用いて積雪分布を補正する手法を組み込んだ、融雪・流出モデルを開発し、融雪期におけるダム流入量の計算精度を検証した。
- 2) 北海道内の 3 ダムに適用した結果、融雪期のダム流入量を精度良く計算できた。特に、ダム管理に対して有用である、融雪中期から後期にかけての計算精度が向上した。
- 3) 融雪初期に複数の積雪分布のケースを設定することにより、ダム流入量の計算精度が低くなることを回避することが可能であった。

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) 陸旻蛟, 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) 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, 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, 浜本聡: 尾根と植生を考慮したダム流域の積雪包蔵水量推定の試み, 土木学会北海道支部平成 23 年度年次技術研究発表会, B-31, 2012.
- 8) 小池俊夫, 高橋裕, 吉野昭一: 融雪量分布のモデル化に関する研究, 土木学会論文集第 363 号/II-4, pp.165-174, 1985.
- 9) 横山隆三, 白沢道生, 菊池祐: 開度による地形特徴の表示, 写真測量とリモートセンシング第 38 巻 4 号, pp.26-34, 1999.
- 10) 鳥谷部寿人, 浜本聡, 石谷隆始: 道内直轄ダムにおける近年の積雪水量と融雪期の水収支について, 平成 22 年度北海道開発技術研究発表会, 2011.
- 11) 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.

A STUDY ON WATER MANAGEMENT OF THE DAM ADAPTED TO SNOW ACCUMULATION AND SNOW MELTING SITUATION

Budget : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2011-2016

Research Team : Watershed Environmental Engineering Research Team

Author : WATANABE Kazuyoshi

NISHIHARA Terumasa

MIZUGAKI Shigeru

KASHIWAYA Kazuhisa

Abstract : In snowy cold regions, snowmelt water serves as an important water resource. Therefore, it is necessary to estimate snow water equivalent in a dam basin and dam inflow during snowmelt season as exactly as possible. Given that snow distributions differ between inside of forest versus outside of forests, we developed a snowmelt runoff model that is able to correct the snow distribution by using observation data from snow survey. This paper reports the results obtained when the model was applied to three dams in Hokkaido, northernmost island of Japan. The accuracy of dam inflow calculation during snowmelt season was higher when proposed method is employed than when no correction is made.

Key words : Snowmelt runoff model, Snow distribution, Forest, Non-forest, Overground-openness

原稿承認

平成 年 月 日

重点的研究開発課題報告書原稿承認伺

(平成26年度)

1 グループ名等	寒地水圏研究グループ		
2 チーム名	水環境保全チーム		
3 重点研究課題名	・積雪・融雪状況に適応した寒冷地ダムの流水管理に関する研究		
4 原稿枚数	全10枚	5 原稿受理	平成 年 月 日
上記のとおり 重点的研究開発課題報告書原稿の承認を伺います。 平成27年 6月19日			
土木研究所理事長 殿	グループ長等	関係上席研究員	執筆者