

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

A study of correcting snow distribution in runoff model using observation data

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 ○正 員 西原照雅 (Terumasa Nishihara)
 室蘭工業大学大学院工学研究科 正 員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)
 (一財) 日本気象協会 北海道支社 正 員 臼谷友秀 (Tomohide Usutani)

1. はじめに

積雪寒冷地の多目的ダムでは、春先の融雪水を貯留し、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な役割を担っている。一方で、融雪水は融雪出水の原因となる。北海道においては、気候変動により、融雪期に豪雨が発生し、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),2)}。

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^{3),4)}。例えば、臼谷ら⁵⁾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^{6),7)}は、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、森林の内外に分けて、ダム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、ダム管理のため、ダム管理所をはじめとした複数の地点において、積雪深等をテレメータで連続観測している。さらに、毎年、積雪調査が行われている。これらの観測値と西原らが開発した手法を用いれば、流域の積雪分布を連続的に推定することができるため、融雪・流出モデルで計算される日々の積雪分布を補正することができる。これにより、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⁵⁾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手法を検討した。

2. 融雪・流出モデルの概要

臼谷ら⁵⁾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、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ている。モデルによる計算手順は、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て、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

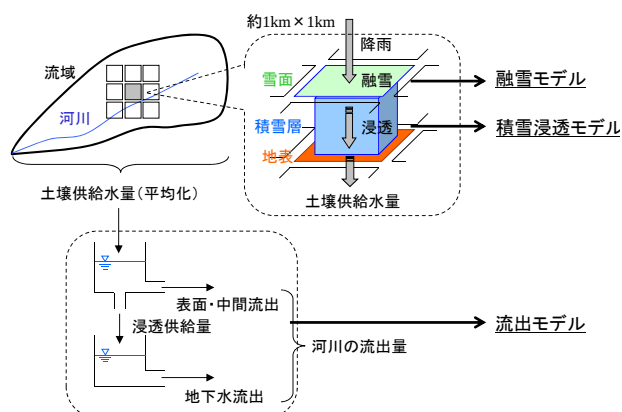


図-1 融雪・流出モデルの概要⁵⁾

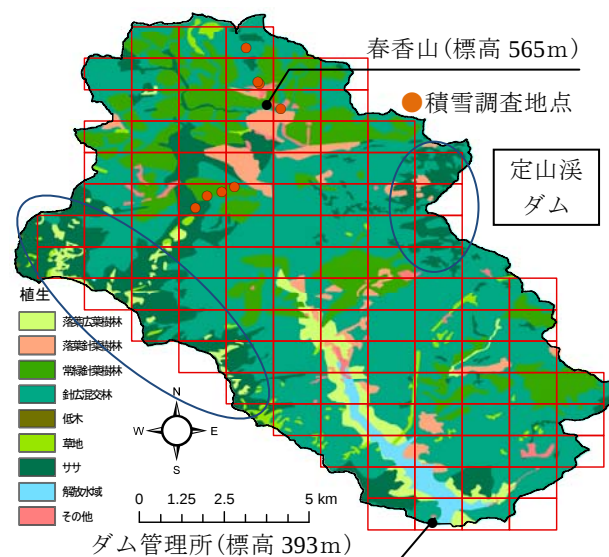


図-2 対象ダムと観測点の位置

供給水量を流域全体にわたってランピングし、流出モデルの入力値とする。最後に、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に示す定山溪ダムである。定山溪ダムは、石狩川水系豊平川流域の上流部に位置し、流域面積は104km²、標高帯は300m付近～1,300m付近である。

図-2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ているが、流域の大部分は森林である。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っている。

定山溪ダム流域では、図-2 に示したダム管理所と春香山の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。さらに、積雪相当水量分布の補正には、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・流出モデルを用いてダム流入量を計算する際に、ダム管理所においてルーチ的に観測している気象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

既往文献によると、森林の内外では積雪分布の特徴が異なることが多数報告されている（例えば^{6),7),8)}。そこで本研究では、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。既往研究⁹⁾によると、定山溪ダムでは、標高が高くなるにともない、標高帯の面積に占める森林植生の面積の割合が減少し、この割合が60%を下回った標高帯以上では、森林内と比較して積雪深が減少していることが報告されている。そこで、図-2 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60%を下回ったメッシュを森林外と扱うこととした。

各メッシュについて、森林の内外を判定した結果を図-3 に示す。図を見ると、図-2 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。ダム流域の111メッシュの内、17メッシュが森林外と判定された。

4-2. 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⁶⁾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。

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

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、流域内の2箇所ではテレメータ観測している積雪深から求める必要があるが、すべての回帰係数を求めることはできないため、 $a_2 \sim a_4$ 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。 a_1 及び a_5 は、2つのテレメータ観測地点の積雪深及び標高を用いて、式(2)に示す直線式を作成した結果より決定した。

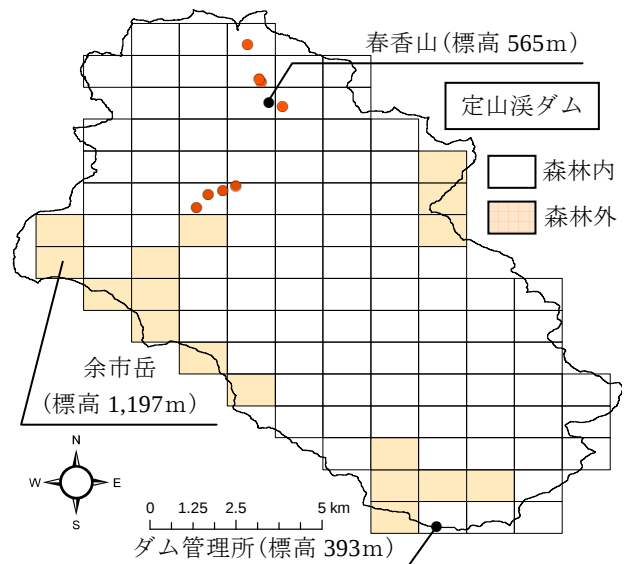


図-3 各メッシュの森林内外の判定結果

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

4-3. 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⁷⁾が提案している地上開度をパラメータに用いる手法を採用する。地上開度とは、横山ら¹⁰⁾が開発した指標であり、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。

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

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、定山溪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、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を分析した。航空レーザ測量の詳細は文献⁷⁾を参照されたい。図-4に標高と積雪深の関係を示す。航空レーザ測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-5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-5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、図-5中に示した直線の式が必要となるため、最低2点の地上開度に対し積雪深を

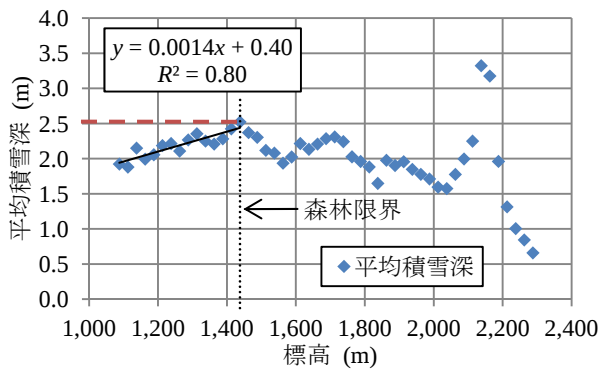


図-4 標高と積雪深の関係⁷⁾

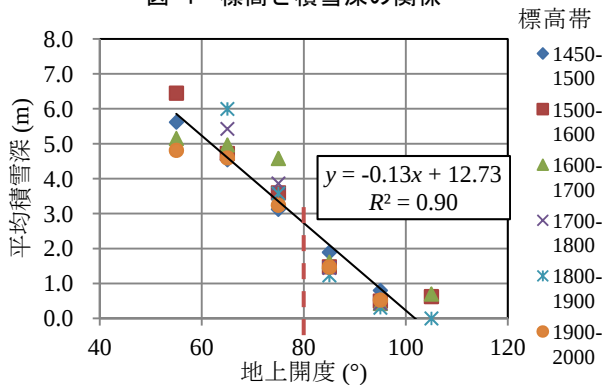


図-5 地上開度と森林外の積雪深の関係

決める必要はない。この2点は、図-4及び図-5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-6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90°以下の範囲から選定することとする。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-4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-5において、地上開度80°付近に対応する。そこで、この関係を定山溪ダムに当てはめることとした。定山溪ダムにおいて、標高を100mピッチに区切り、標高帯の面積に占める森林植生の面積の割合を求めると、900m～1000mの標高帯で60%を下回る。そこで、式(2)を用いて求めた標高950mにおける積雪深を、地上開度80°における積雪深とする。

以上のように決定した地上開度80°及び100°の積雪深を用い、式(3)を作成することとした。

なお、積雪深の補正は日データを用いて毎日行った。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。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り、式(1)～(3)の積雪深SDを積雪相当水量に置き換えている。

表-1 Nash-Sutcliffe 指標 (ダム流入量)

	本手法	補正無し	標高法
2008	0.596	-0.453	0.060
2009	0.921	0.780	0.793
2010	0.821	0.912	0.722
2011	0.794	0.833	0.736
2012	0.842	0.861	0.782
平均	0.795	0.587	0.619

表-2 全流出量 (ダム地点) (m³/s)

	観測	本手法	補正無し	標高法
2008	586	516	984	858
2009	968	907	860	1,216
2010	938	1,065	959	1,219
2011	878	1,095	991	1,190
2012	829	970	956	1,087

5. 結果と考察

計算は、2008年～2012年の5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、この方法で補正した計算も行った。(標高法と標記)。

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¹¹⁾を、表-2にダム地点における全流出量をそれぞれ示す。対象とした期間は、各年とも積雪調査日の翌日から、全メッシュの積雪深が0となった日の前日までとした。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。

はじめに表-1を見ると、2010年～2012年は、補正無しの場合でも精度が高く、本手法による精度の向上が見られなかった。しかし、補正無しの場合には、2008年のように極端に精度の低い年が見られ、2008年及び2009年については、本手法による精度の向上が見られた。一方、標高法の結果を見ると、全般的に本手法よりも計算精度が低く、補正無しの場合と同様、極端に精度が低い年が存在する。

次に、表-2に示したダム地点における全流出量を見ると、補正無し及び標高法の精度が極端に低い2008年は、両手法とも全流出量がかかなり大きい。このことが、これら2手法の精度を大きく低下させた要因と考えられる。また、標高法では、全流出量が過大になる傾向があり、全般的に精度が低い原因と考えられる。

ここからは、本手法により精度が最も向上した2008年の結果を示す。図-6はダム流入量である。さらに、標高が高く、植生が森林以外のメッシュの計算結果の例として、図-3において「余市岳」と標記したメッシュの積雪深及び積雪相当水量を図-7及び図-8にそれぞれ示す。はじめに図-6を見ると、融雪初期は3手法ともほぼ同じ結果になっている。しかし、融雪が進むにしたがい、4/3頃から本手法の結果が他の2手法の結果より小さくなる。さらに、5/1頃からは標高法の結果が補正無しの結果より小さくなる。また、図-7及び図-8を見ると、4月上旬以降の積雪深及び積雪相当水量は、補正なしが最も大きく、本手法が最も小さい。このことから、

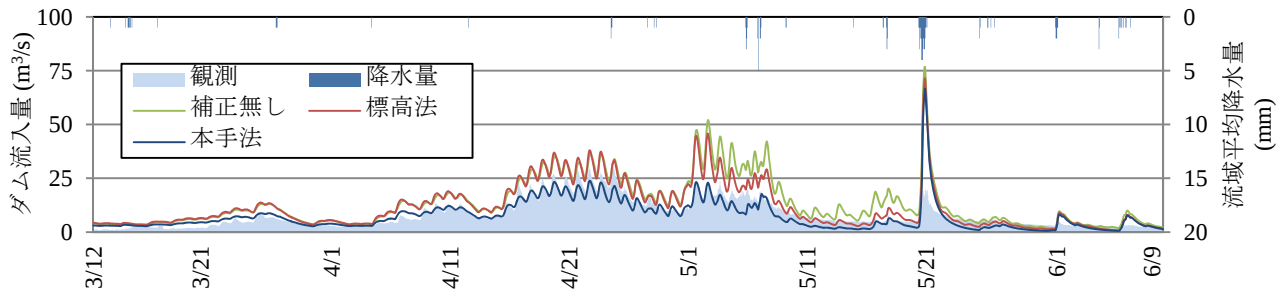


図-6 ダム流入量 (2008 年融雪期)

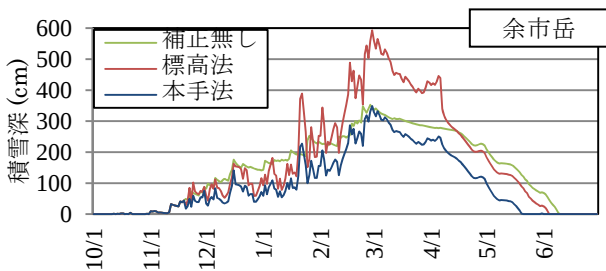


図-7 積雪深の計算結果 (2007/11-2008/6)

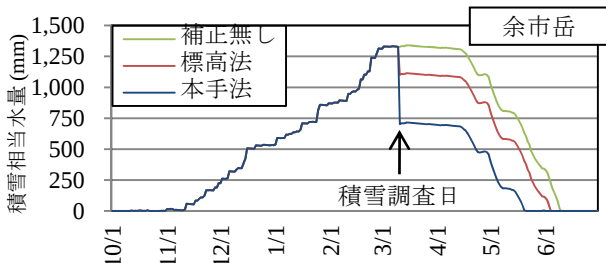


図-8 積雪相当水量の計算結果 (2007/11-2008/6)

図-6 において融雪が進むにともない計算結果に差が生じる要因は、融雪中期から後期にかけて積雪が存在する、標高が高いメッシュの積雪量にあると考えられる。特に、標高法を用いた場合、標高が高いメッシュは積雪量が多くなるように補正がなされる。しかし、実際には、植生が森林以外の場合、風の影響により積雪量が多くなりにくいと考えられ、補正により積雪量が過大になる可能性がある。このような現象は、図-7 及び図-8 において、標高法の結果が本手法の結果を大きく上回っている点に現れている。さらに、表-2 において、標高法的全流出量が全般的に多い要因とも考えられる。また、積雪調査結果を用いた積雪相当水量の補正は、精度を大幅に改善する効果があったと考えられる。図-8 を見ると、2008 年は積雪相当水量が過大に計算される傾向があったが、本手法を用いた場合は、積雪調査結果により積雪相当水量がほぼ 1/2 に補正されている。この補正により、表-2 における全流出量と、図-6 における融雪後期のダム流入量の精度が高くなったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、臼谷ら⁵⁾が提案した融雪・流出モデルを対象に、観測値を用いて積雪深及び積雪相当水量を補正する方法を検討した。森林の内外で積雪分布の特徴が異なることから、森林の内外で異なる補正法を採用した。

補正を行うことにより、安定した精度で融雪期のダム流入量を計算できた。さらに、従来良く用いられている標高を用いた補正法と比較して、標高が高く、森林以外の植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を改善する可能性があることがわかった。

謝辞： 本論文をまとめるにあたり、国土交通省北海道開発局豊平川ダム統合管理事務所からデータを提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

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) 臼谷友秀，中津川誠：北海道における冬期温暖化の傾向と水循環へ与える影響，地球環境シンポジウム講演論文集，Vol.13, pp.1-6, 2005.
- 3) 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.
- 4) 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，N0.691/II-57, pp.25-41, 2001.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 山田知充，西村寛，水津重雄，若浜五郎：大雪山旭岳西斜面における積雪の分布と堆積・融雪過程，低温科学物理篇37, pp.1-12, 1978.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.: River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles -, J. of Hydrology I (10), pp.282-290, 1970.