

観測データによる融雪流出モデルの精度検証

A Verification of Accuracy of the Snowmelt Runoff Model by 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. まえがき

積雪寒冷地の多目的ダムでは、春先の融雪水を貯留して夏季にかけての水利用を賄っており、融雪水は水資源として重要な役割を担っている。一方で、融雪水は災害の原因ともなる。北海道においては、気候変動により、積雪期や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や土砂災害が懸念されている¹⁾。実際に2012年5月には、融雪がピークの頃に記録的な降雨があり、美利河ダムにおいて異常洪水時防災操作（いわゆる、ただし書き操作）が行われた他、北海道内各地で土砂災害や浸水被害が発生した。

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)}。一方、臼谷ら⁵⁾は、融雪期の流出過程を、雪面での融雪、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、積雪の表面で発生した融雪水が土壤に達するまでの時間（積雪内の浸透時間）を考慮したものとなっている。

融雪期においては、土壤に供給される融雪水を考慮することが、流出の規模や土砂災害の危険性を評価する上で重要である⁶⁾。しかし、融雪流出モデルの精度については、アメダスによる気象観測値、河川やダムにおける水文観測値との比較による検証がほとんどである。観測例が少ないことから、土壤へ供給される水量等は、観測値との比較がなされた例が少ない。

定山溪ダム流木処理場においては、アメダスで一般的に観測されている要素に加えて、放射量、積雪底面流出量等を観測している。そこで、本研究では、北海道の一部のダムにおいて実用化されている臼谷ら⁵⁾が提案した融雪流出モデルを対象とし、積雪底面流出量及び毎日の積雪表面融雪量のピーク時刻と積雪底面流出量のピーク時刻の時間差について、計算値と観測値の比較を行った。

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は、図-1に示すように、融雪モデル、積雪浸透モデル、流出モデルの3種類のモデルから構成されている。モデルによる計算は、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、気象観測値から土壤供給水量を推定する。次に、メッシュ毎の土壤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。

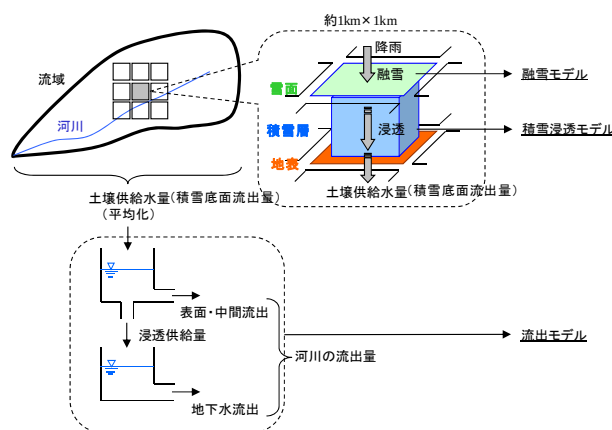


図-1 融雪流出モデルの概要（臼谷ら(2007)に加筆）

各モデルについて概説すると、融雪モデルは、近藤ら⁷⁾が提案した熱収支法を基本とし、植生の影響が考慮されている。積雪浸透モデルは中津川ら⁸⁾が提案した1価線形貯留関数法を用いている。なお、融雪水と降雨の浸透は別々に扱い、融雪水は浸透を考慮し、降雨は浸透を考慮せず、土壤に直接到達させている⁵⁾。流出モデルは、2段タンク型貯留関数モデルを採用している⁹⁾。

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付近であり、流域の土地利用の多くは森林である。

観測は、ダム湖上流端付近に位置している流木処理場に設置した気象観測露場にて実施した。標高は400mである。観測項目と観測の機器構成は、それぞれ表-1及び図-3に示す。観測値は毎正時の値である。また、積雪底面流出量は、2m×2mのライシメータを設置して観測した。流量計の分解能は0.25mmである。

融雪流出モデルによる計算期間は2011年10月～2012年6月とした。入力データはダム管理所における気象観測値である。なお、厳冬期の積雪底面流出量は1mm/day程度でほぼ一定値であり、明確な日ピークが見られない。そこで、検証期間は融雪初期にあたる2012年4月1日から、気象観測露場において積雪が観測されていた4月28日までとした。モデルではメッシュ毎に積雪底面流出量等を計算しているため、検証には気象観測露場地点を含むメッシュの計算値を用いた。

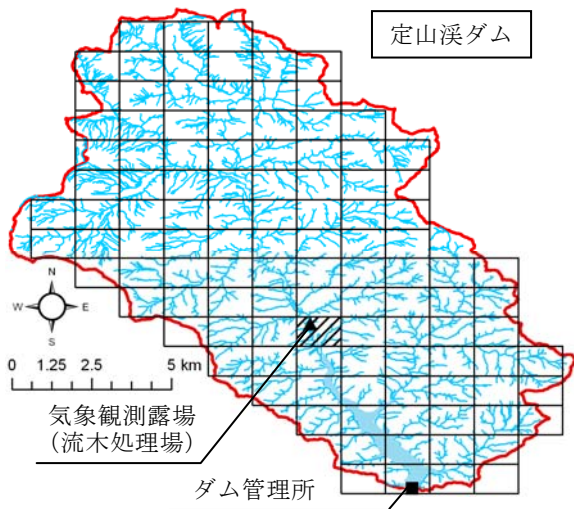


図-2 対象ダムと気象観測露場の位置

表-1 観測項目

観測項目	計測器名	単位
積雪底面流出量	ライシメータ + 転倒ます型流量計	mm/hr
積雪重量	積雪重量計	kg/m ²
降水量	雨雪量計	mm/hr
積雪深	積雪深計	Cm
気温	温度計	℃
湿度	湿度計	%
風速	風速計	m/s
下向き短波放射計	長短波放射計	W/m ²
下向き長波放射計		W/m ²
上向き短波放射計		W/m ²
上向き長波放射計		W/m ²
積雪表面温度	放射温度計	℃

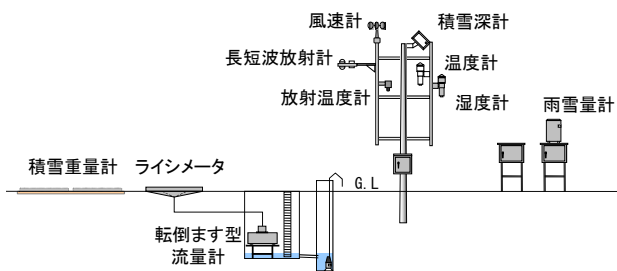


図-3 観測機器の構成

4. 融雪流出モデルの計算値と観測値の比較

4-1. ダム流入量

はじめに、融雪流出モデルによるダム流入量の計算値を図-4に示す。期間は融雪期である2012年4月～5月である。併せてダム流入量の観測値とダム管理所で観測された降水量を示す。図を見ると、モデルの計算値は融雪期のダム流入量の傾向を捉え、精度良くダム流入量を求めていることがわかる。観測値を真値として、相対誤差と Nash-Sutcliffe 指標を求めたところ、それぞれ 42%, 0.848 であった。一般的に、Nash-Sutcliffe 指標が 0.8 程度を超えていれば計算値の精度が高いと判断されることから、誤差指標からも精度の高さを確認できる。

4-2. 積雪底面流出量（土壌供給水量）

次に、積雪底面流出量の計算値を図-5に示す。これは、気象観測露場を含むメッシュの計算値である。期間は、4月1日から、気象観測露場において積雪が観測されていた4月28日までである。なお、降水が観測された日が含まれるため、積雪底面流出量には、融雪による流出に加えて、降水による流出が含まれる日がある。

図を見ると、4月上旬の日合計積雪底面流出量は、規模の大きい降水が観測された4月3日付近を除き、1～3mm/dayであり、厳冬期の流出量に近い値となっている。4月10日頃より、計算値及び観測値ともに流出量の時間変動が大きくなり、この頃に融雪流出が始まったと考えられる。融雪流出が始まって以降は、流出量の日変動が少しずつ大きくなり、4月26日頃にピークとなっている。計算値と観測値を比較すると、前述した傾向を良く捉えていることがわかる。観測値を真値として相対誤差と Nash-Sutcliffe 指標を求めたところ、それぞれ 50%, 0.649 であった。

一方で、計算値を細かく見ると、毎日のピーク付近の流出量を過小に、ピーク後の流出量を過大に計算する傾向が見られる。この傾向をより明確にするため、毎日の積雪底面流出量がピークとなる時間帯の12:00～17:00とこれ以外の時間帯に分けて、計算値と観測値を比較した。結果を図-6及び図-7にそれぞれ示す。縦軸を観測値、横軸を計算値としたため、図に示した斜め45度の点線に近いほど、計算値が観測値に近いことを示している。なお、降水が観測された日は、積雪底面流出量に対する降水の影響が大きいため、除外している。

はじめに図-6を見ると、ほとんどの点が点線よりも上にあり、積雪底面流出量の計算値は観測値と比較して

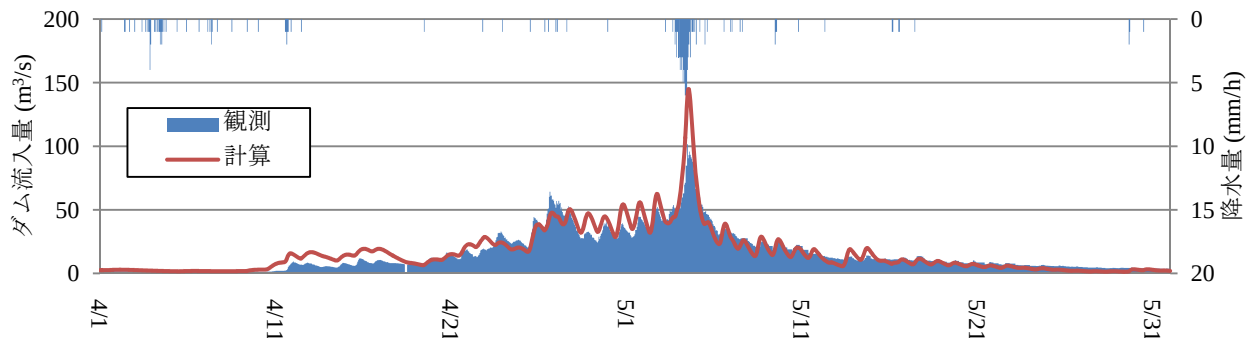


図-4 ダム流入量の計算値と観測値の比較

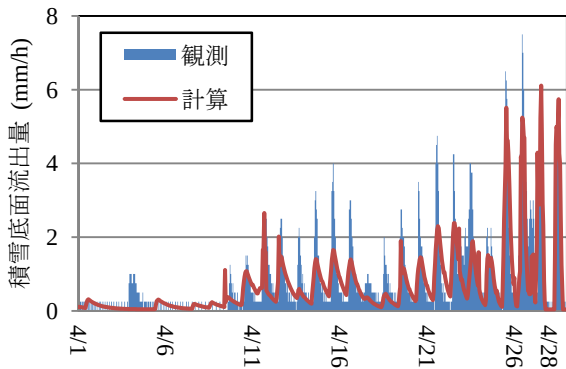


図-5 積雪底面流出量の計算値と観測値の比較

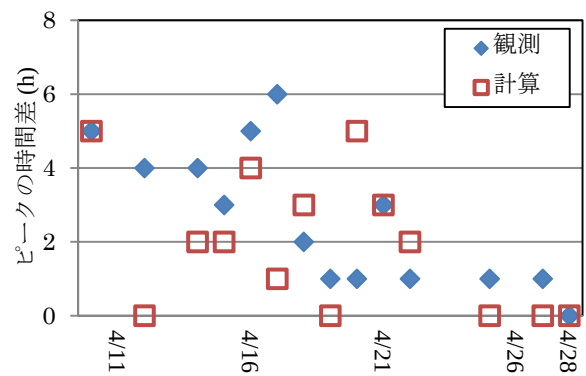
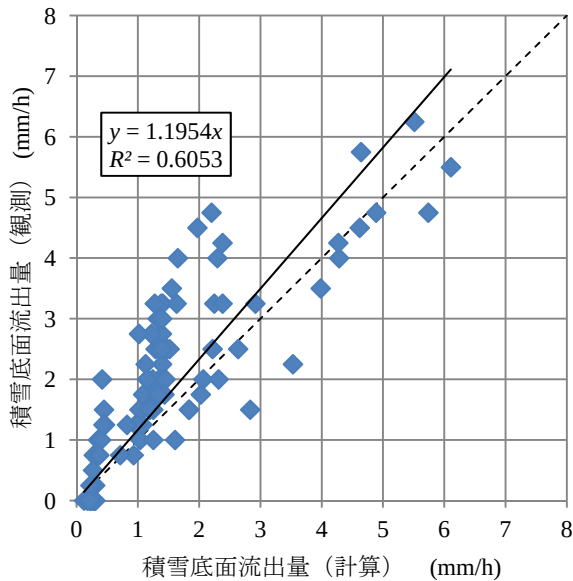
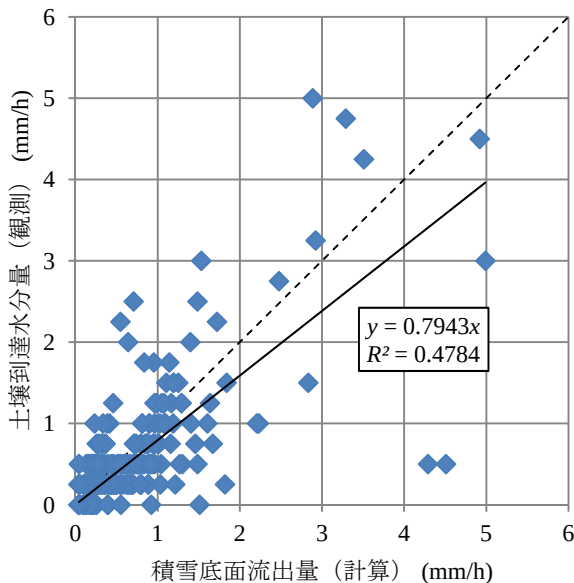


図-8 積雪表面融雪量と積雪底面流出量のピーク時刻の時間差

図-6 積雪底面流出量の計算値と観測値の比較
(12:00~17:00, 降水日を除く)図-7 積雪底面流出量の計算値と観測値の比較
(12:00~17:00 以外, 降水日を除く)

過小となる傾向が明瞭になった。図には、切片を 0 として求めた回帰直線を示しているが、この傾きから、観測値は計算値の概ね 1.2 倍であることがわかる。

次に、図-7 を見ると、12:00 から 17:00 の時間帯と比較してばらつきが大きいものの、積雪底面流出量の計算値は観測値と比較して過大となる傾向が見られる。図-6 と同様に回帰直線を示しているが、観測値は計算値の概ね 0.8 倍であることがわかる。

4-3. 積雪表面融雪量のピーク時刻と積雪底面流出量のピーク時刻の時間差

数馬田¹⁰⁾は、定山溪ダムの気象観測露場及びダム管理所における気象・水文観測結果を用いて、積雪表面融雪熱量、積雪底面流出量、ダム流入量の関係进行分析している。結果、毎日の積雪表面融雪量のピーク時刻と積雪底面流出量のピーク時刻の差は、融雪初期は 4 時間から 8 時間程度であること、融雪が進むに伴い時間差が短くなり、1 時間を下回った後に融雪最盛期に達して、ダム流入量が大きくなることを示している。そこで、この時間差についても計算値と観測値の比較を行った。観測値は、放射量、気温、風速及び積雪表面温度の観測値より積雪表面の融雪熱量を求め、このピーク時刻と積雪底面流出量のピーク時刻の差とした。また、計算値は、積雪表面の融雪量のピーク時刻と積雪底面流出量のピーク時刻の差とした。結果を図-8 に示す。なお、降水が観測された日は除外している。さらに、融雪初期は積雪底面流出量が少なく、日ピークが明瞭に現れないため、4 月 10 日からの値を示した。

図を見ると、観測値は、融雪初期から融雪最盛期に向かって徐々に小さくなり、融雪最盛期には時間差が 0 から 1 時間になっている。一方で、計算値は変動が大きく、観測値のような減少傾向を捉えにくい。時間差が 1 時間を下回った後に、ダム流入量が大きくなるため、いつ 1 時間を下回るかを把握することが重要である¹⁰⁾。しかし、計算値は変動が大きく、計算値を用いてダム流入量が増加するタイミングを把握することは困難と思慮される。なお、計算値及び観測値ともに、4 月 26 日頃からの融雪最盛期には時間差が 0 から 1 時間となっており、傾向が一致していた。

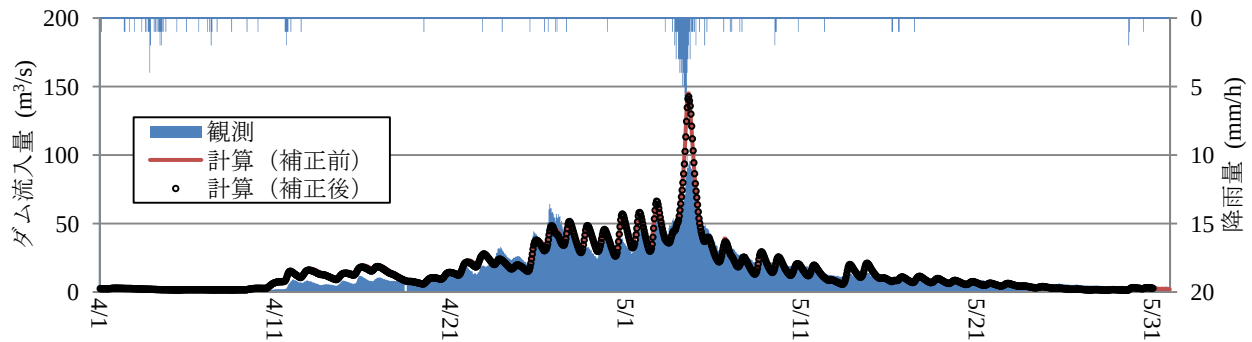


図-10 ダム流入量の計算値と観測値の比較（積雪底面流出量補正後）

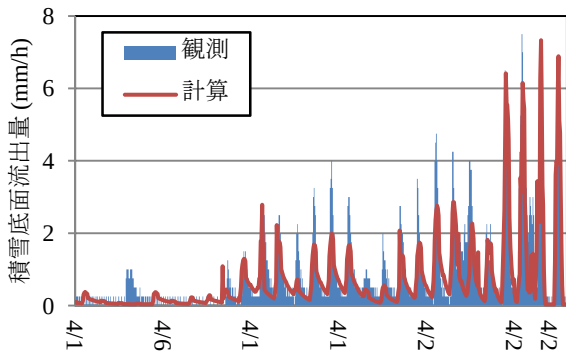


図-9 積雪底面流出量の計算値と観測値の比較（補正後）

5. 積雪底面流出量の補正の試み

4章で考察した結果、積雪底面流出量の観測値は、対象とした融雪流出モデルによる計算値と比較して、流出量がピークとなる12:00から17:00は概ね1.2倍、これ以外の時間帯は概ね0.8倍となっていた。そこで、モデルで計算される積雪底面流出量を、12:00から17:00は1.2倍、これ以外の時間帯は0.8倍に補正することを試みた。結果を図-9に示す。図-5と比較すると、融雪最盛期のピーク流出量及び計算値が過大となっていた時間帯の流出量の精度が改善していることがわかる。しかし、4月中旬ではピーク流出量を過小に計算する傾向は改善されていない。観測値を真値として相対誤差とNash-Sutcliffe指標を求めたところ、それぞれ48%、0.668であり若干の精度向上に留まった。

最後に、積雪底面流出量を補正してダム流入量を求めた結果を示す。こちら、計算値の精度は若干の向上に留まった。観測値を真値として、相対誤差とNash-Sutcliffe指標を求めたところ、それぞれ39%、0.854であった。

6. まとめ

積雪底面流出量等の観測例が少ない要素について、北海道の一部のダムで実用化されている融雪流出モデルを対象とし、計算値と観測値を比較した。

対象とした融雪流出モデルによる積雪底面流出量は、観測値の傾向を概ね捉えていたものの、毎日のピーク付近の流出量を過小に、ピーク後の流出量を過大に計算する傾向が見られた。

また、計算値から求めた積雪表面融雪量のピーク時刻と積雪底面流出量のピーク時刻の差は、観測値から求めた時間差と比較して変動が大きく、モデルの計算値をダム管理にあたっての指標とすることは困難と考えられる。

最後に、簡潔な補正方法で積雪底面流出量とダム流出量の計算値の精度向上を試みたが、若干の精度向上に留まった。

謝辞： 本論文をまとめるにあたり、国土交通省豊平川ダム統管理事務所からデータや観測場所の提供を受けるなど多大な協力を頂いた。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) 臼谷友秀，中津川誠，松岡直基：融雪期の土砂災害に関連する土壌水分の定量評価，土木学会論文集B1(水工学)，2013. (印刷中)
- 7) 近藤純正編著：水環境の気象学，朝倉書店，1994.
- 8) 中津川誠，工藤啓介，星清：積雪貯留を考慮した汎用的な融雪流出解析，水工学論文集，第48巻，pp.37-42，2004.
- 9) 馬場仁志，星清，藤田睦博：蒸発散及び浸透を組み合わせた二段貯留関数型流出モデルの開発，水文・水資源学会誌，第14巻，第5号，pp.364-375，2001.
- 10) 数馬田貢，西原照雅：融雪熱量及び積雪底面流出量の融雪期におけるダム管理への適用に関する検討，土木学会第67回年次学術講演会，II-153，2012.