

# 貯水池操作を対象とした融雪流出予測

A study on snowmelt runoff prediction for reservoir operation

正会員 八田茂実 (Shigemi HATTA)  
 岩崎理樹 (Toshiki IWASAKI)  
 菊池康則 (Yasunori KIKUCHI)

苦小牧工業高等専門学校  
 苦小牧工業高等専門学校  
 苦小牧工業高等専門学校

## 1 はじめに

春先の融雪出水は量的にも流出のタイミングからみても農業用水などの重要な水資源であり、同時に融雪出水や雪崩等を引き起こす災害要因でもある。

豪雪地帯に位置するダムでは、長期間にわたって水位維持のための貯水池操作が必要となる。図-1は、道内の3つのダムの融雪期の降雨のない期間に観測されたダム流入量の日変化を示したものである。このように、北海道内ではダム流域レベルで、融雪流出により生じる流量のピークは19時以降に発生することが多い。これは融雪最盛期の数週間、夜間の貯水池操作が必要であることを意味しており、貯水池の管理者にとっては大きな負担となっている。一方、図-2は1996年の融雪期に定山溪ダムでライシメータを使って観測された融雪量を示している。積雪層内の浸透があるためライシメータに到達するまでの相違はあるものの、融雪最盛期には融雪の大半が18時までに終了していることが分かる。すなわち、貯水池操作で対象としている夕方から夜間にかけて生じる融雪流出は、17時の時点でほぼ計算可能な融雪量によって生じていると考えられる。このため、退行前に当日の融雪量を正しく算定し、これに基づいて融雪流出量を予測することができれば、夜間の貯水池操作が必要であるかを事前に判断することが可能である。本研究では以上のような観点から、特に夜間の融雪流出量を予測する手法の開発を目的とする。

## 2 対象流域の概要

本研究で対象とした流域は、豊平川上流部にある定山溪ダム流域である。定山溪ダム流域は、流域面積104km<sup>2</sup>、流域の高度分布が380m~1300mとなっている。図-3に流域の概要を示す。ダム管理所(図-3中のA点)では、ダム流入量や雨量のほかに気温・湿度・風速・気圧・日照時間・日射量等の気象要素が1時間単位で観測されている。また、図-3中のB点では1993年から1998年にかけて融雪関連の観測が集中的に実施されており、融雪量の測定とあわせて観測項目に雪面アルベドや正味放射量を加えた気象観測も実施されている。さらに融雪開始前には、流域内に設定されたスノーコースに沿って積雪水量の調査も実施されている。

## 3 流域融雪量の推定

### 3.1 熱収支法に基づく地点融雪量の算定

融雪量は積雪表面・積雪下面と積雪の熱交換を推定することで計算することが可能である。北海道のような寒冷地では、積雪下面からの熱量は小さく、融雪のほとんどが積雪表面の熱収支から説明できる<sup>1)</sup>。このため、融雪に作用する熱量 $Q_M$ は、積雪表面での正味放射量 $Q_R$ 、顕熱交換

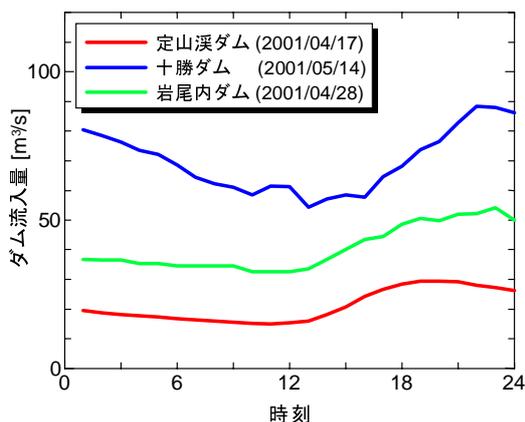


図-1 融雪期のダム流入量の日変化(定山溪ダム・十勝ダム・岩尾内ダム;2001年)

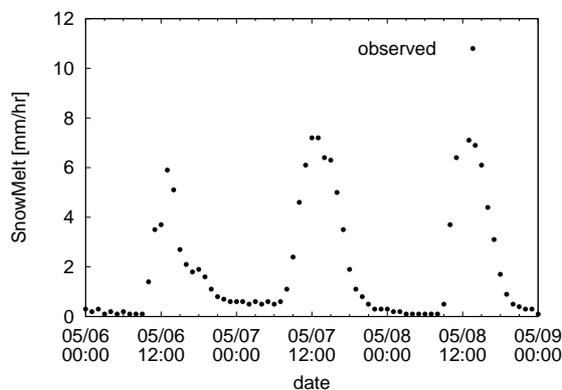


図-2 ライシメータによる観測融雪量(定山溪ダム地点1996年)

量 $Q_A$ 、潜熱交換量 $lE$ を用いて、次式のように表すことができる。

$$Q_M = Q_R + Q_A + lE \quad (1)$$

融雪量は、計算された融雪熱量を氷の融解潜熱 $L_m$ で除して求められる。

$$M = Q_M / L_m \quad (2)$$

式(1)中の顕熱交換量、潜熱交換量は以下のバルク式によって計算できる。

$$Q_A = c_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (3)$$

$$lE = l \rho C_E U (q - q_{SAT}) \quad (4)$$

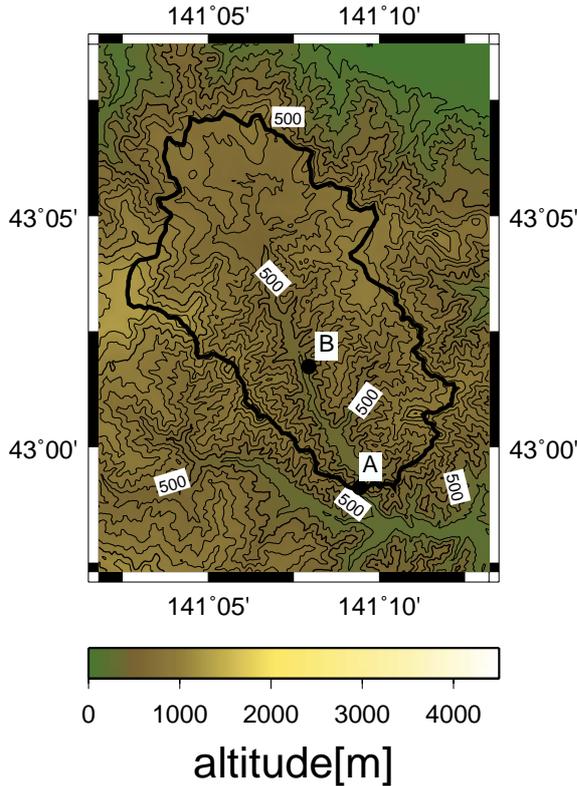


図- 3 定山溪ダム流域の概要

ここで、 $c_p$  は空気定圧比熱、 $\rho$  は空気密度、 $C_H, C_E$  はバルク係数 ( $1.1 \sim 1.3 \times 10^{-3}$ )、 $U$  は風速、 $T_s, T_a$  は積雪及び空気温度 ( )、 $q$  は比湿で、添え字の SAT は飽和時の値を意味している。これらの量はダム管理所で収集されている気象要素から計算可能である。尚、積雪表面温度は次式のような太田<sup>3)</sup>の実験式を採用した。

$$T_s = \min(1.13T_a - 1.67, 0) \quad (5)$$

その他の具体的な計算式は成書(たとえば近藤<sup>2)</sup>)を参照されたい。

一方、正味放射量は雪面での短波長放射、長波長放射の和として以下のように表すことができる。

$$Q_R = (1 - ref)I + L \downarrow - \epsilon \sigma (T_s + 273.15)^4 \quad (6)$$

ここで、 $ref$  はアルベド、 $I$  は日射量、 $L \downarrow$  は下向きの長波長放射、 $\epsilon$  は雪面の射出率、 $\sigma$  はステファン=ボルツマン定数である。ダム管理所では日射量は測定されているがその他の量については、通常観測されていないため、何らかの推定式を当てはめる必要がある。本研究では、下向きの長波長放射量の推定には太田<sup>3)</sup>が提案している次式を用いた。

$$L \downarrow = (1 + 0.2(1 - C_c))(0.51 + 0.066\sqrt{e}) \quad (7)$$

$$\times \sigma (T_a + 273.15)^4$$

$$C_c = (I/I_{00})/F \quad (8)$$

ここで、 $e$  は水蒸気圧 (hPa)、 $I_{00}$  は大気外放射量、 $F$  は見かけの大気透過率で、日照率が1のときの大気外放射量に対する全天日射量の比で表される。また、雪面アルベドの

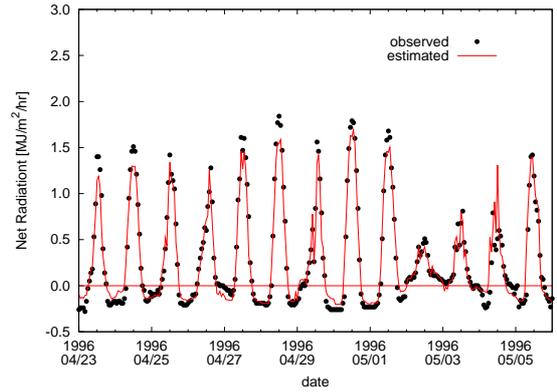


図- 4 正味放射モデルによる計算結果 (定山溪ダム地点 1996年)

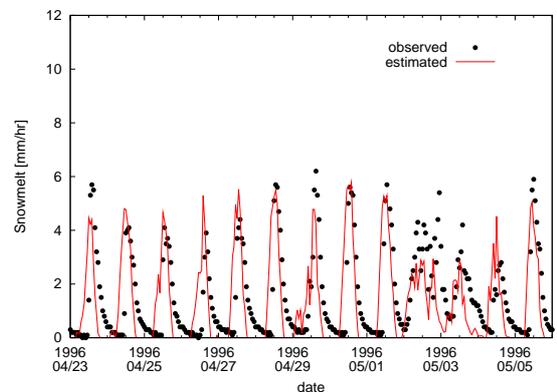


図- 5 熱収支法による融雪量の算定結果 (定山溪ダム地点 1996年)

推定には山崎ら<sup>4)</sup>の実験式を採用した。山崎らの式は以下のように表される。

$$ref_0 = ref_{max} \quad (9)$$

$$ref_n = (ref_{n-1} - ref_{min} \exp(-\frac{1}{k})) + ref_{min} \quad (10)$$

$$ref_{max} = \begin{cases} -0.12T_a + 0.76 & (T_a \geq 0.1) \\ 0.88 & (T_a < 0.1) \end{cases} \quad (11)$$

$$k = \begin{cases} -4.9T_a + 4.5 & (T_a \leq 0.1) \\ 4.0 & (T_a > 0.1) \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 $ref_0, ref_n$  は降雪日および降雪日から  $n$  日目のアルベド、 $ref_{max}, ref_{min}$  は積雪の最大・最小アルベドである。

図-4は、定山溪ダムの B 地点で観測されている正味放射量の測定値と、ここまで示した正味放射量モデルによる計算結果を示したものである。また、図-5は計算された融雪量とライシメータで観測された融雪量を示している。いずれも計算値と実測値はよく一致しており、これまで示した融雪モデルが妥当であることが確認できる。

### 3.2 流域内の融雪量の推定

ここまで示した式(1)~(12)を用いることにより、気象観測がなされている地点の融雪量を求めることが可能である。流域内の融雪量を推定するためには、融雪の発生する積雪域を明らかにするとともに、地形に応じた気象要素の

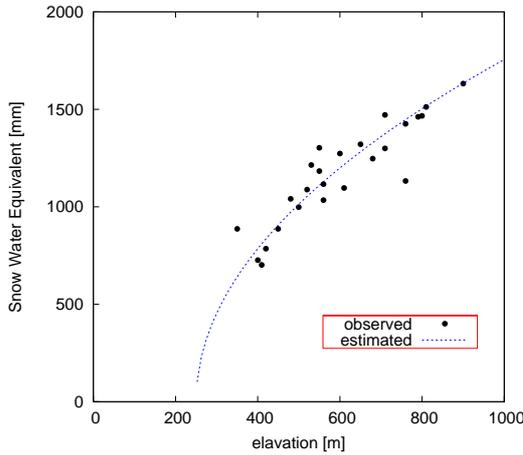


図- 6 積雪水量と標高の関係 (定山沢ダム 1996 年)

補正が必要となる。本研究では、対象流域をメッシュ分割し、メッシュごとの積雪の有無を判定するとともに、流域の地形特性に応じた気象補正を行ったうえで融雪モデルを適用した。

一般に積雪水量は、標高に対して直線的に増加することが知られており<sup>5, 6)</sup>、流域内の積雪水量の推定には積雪水量と標高の一次式が利用されることが多い。図-6は定山沢ダム流域の1996年の積雪調査からプロットした標高と積雪水量の関係を示している。図に示したように、対象流域では標高に対する積雪水量の分布は、必ずしも直線的となっていない。このため、本研究では標高と積雪水量の関係を次式のような指数関数で近似することとした。

$$SWE(h) = a_1(h - h_0)^{a_2} \quad (13)$$

ここで、 $a_1, a_2$  は係数、 $h_0$  は雪線標高である。本研究では、積雪水量の高度分布特性を利用して流域内の初期積雪水量分布を推定し、総融雪量はその地点の初期積雪水量に達するまでは積雪が存在するものとして計算を行っている。

一方、地形の影響による気象要素の補正は、融雪量算定に大きな影響を与える気温と日射量について行った。気温については対象メッシュの標高から気温減率を用いて補正した。また、日射量については対象流域のメッシュ標高値から作成した各メッシュ点の斜面の勾配  $\alpha$  (南向きを正、北向きを負とする)、斜面の向き  $\chi$  (真北・真南からの角度)、太陽高度  $\lambda$  から算出される受光係数と呼ばれる指標を用いて補正を行った<sup>7)</sup>。受光係数  $SC$  は、次式のように表わされる。

$$SC = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cos \chi}{\tan \lambda} \quad (14)$$

受光係数を用いると、任意地点  $N$  における日射量  $I_N$  は平坦地の観測日射量  $I_0$  から次式のように求めることができる。

$$I_N = \frac{SC_N}{SC_0} I_0 \quad (15)$$

ここで、 $SC_N, SC_0$  はそれぞれ対象地点と観測地点の受光係数である。

流域内の融雪量は、メッシュ点ごとに補正された気温・日射量を前節の融雪量算定モデルに与えて計算した。

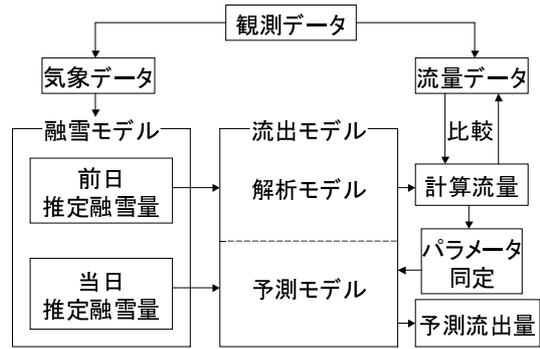


図- 7 モデルによる融雪流出予測の手順

#### 4 夜間融雪流出の予測

前節のように計算された融雪量を既存の流出モデルへの入力として融雪流出量を推定する。冒頭に示したように、本研究で予測の対象としている17時以降の夜間融雪量は、予測開始時点で既に計算可能な融雪量で構成されていると考えてよい。また、貯水池操作が最も重要となる融雪最盛期では、流域全体が積雪に覆われていることが多く、連続的に融雪水が流域に入力されるため、積雪域や流域の湿潤状態が極端に変動することは少ないものと考えられる。このような観点から、本研究では、図-7の手順で夜間融雪量の流出予測を試みる。すなわち、

- [1] これまでに観測されている気象資料から前日の流域融雪量を推定し、実測流量を再現できるように流出モデルのパラメータを同定する。
- [2] 予測日当日の融雪量を算定し、前日の解析で得られた流出モデルのパラメータを利用して、翌日までの融雪流出量を算定する。

このようにして得られた翌日までの流出量が、本研究で対象としている夜間流出量に相当する。

##### (1) 流出モデルの概要

本研究で採用した流出モデルは、損失を考慮した貯留関数法である。このモデルは、貯留関数法に蒸発散量などの損失量を損失機構として取り入れているものである。したがって、観測雨量と観測流量をそのまま用いることができ、直接流出成分と基底流出成分を分離することが難しい融雪流出を予測するのに適したモデルであると考えられる。以下に損失項を含む貯留関数法の式を示す<sup>8)</sup>。

$$s = k_{11}q^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \quad (16)$$

$$\frac{ds}{dt} = r - q - b + q_b \quad (17)$$

$$b = (c_3 - 1)q \quad (18)$$

$$q_b = q_{in} \exp(-\lambda t) \quad (19)$$

また、

$$k_{11} = c_1 A^{0.24}$$

$$k_{12} = c_2 k_{11}^2 \bar{r}^{-0.2648}$$

$$p_1 = 0.6$$

$$p_2 = 0.4648$$

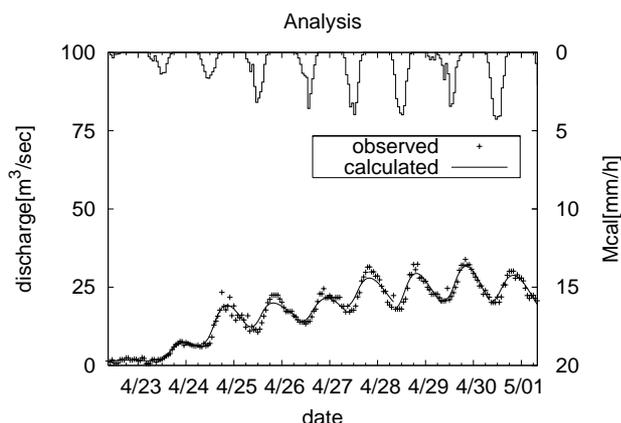


図- 8 融雪流出量の算定 (定山溪ダム地点 1996 年)

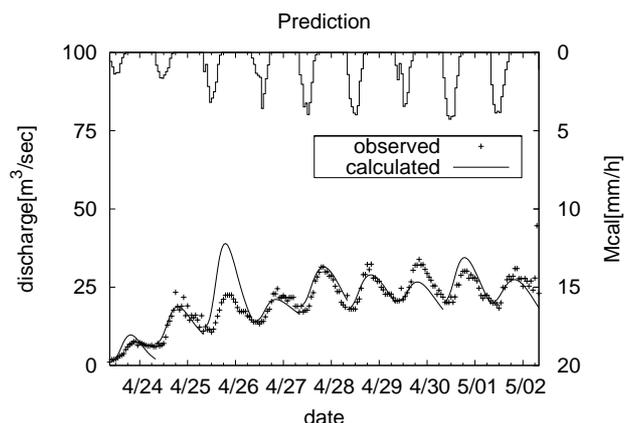


図- 9 夜間融雪流出量の予測 (定山溪ダム地点 1996 年)

ここで、 $s$  は貯留高 (mm),  $r$  は観測雨量 (mm/h),  $q$  は流出高 (mm/h),  $b$  は損失高 (mm/h),  $q_b$  は地下水流出高 (mm/h),  $q_{in}$  は初期流出高 (mm/h),  $k_{11}, k_{12}, p_1, p_2$  はそれぞれ貯留係数・貯留指数,  $\lambda$  は減衰係数,  $A$  は流域面積 ( $\text{km}^2$ ),  $\bar{r}$  は平均雨量強度 (mm/h),  $c_1, c_2, c_3$  は未知定数である。このモデルでは  $c_1, c_2, c_3$  の 3 個の未知定数が含まれており、これらを同定する必要がある。これらの最適化同定法は文献を参照されたい<sup>8)</sup>。なお、パラメータの最適化も含め、計算には北海道河川防災研究センターが発行しているツール<sup>9), 10)</sup>を用いた。

## (2) 流出予測結果

図-8は、定山溪ダム流域の1996年の融雪期に対して、前日の計算融雪量と夜間の実績流量を用いて融雪期間中のハイドログラフの再現を行った結果を示している。計算では1日ごとに流出モデルのパラメータの同定を行っており、採用した流出モデルで融雪流出量を精度よく算定できる。

一方、図-9は、前日の流出解析の結果から定めたモデルパラメータを流出モデルに与え、予測日当日の17時までの計算融雪量を入力として翌日9時までの融雪流出量を予測した結果を示している。前日の融雪量が予測日当日とほぼ同等の場合には、予測流出量は実測流出量をよく再現している。しかし、降融雪量の大きさが前日と大きく異なったり、降雨の影響を受ける場合には必ずしも妥当な結果が得られていない。これは、最終的に流域融雪量の算定誤差などをすべて流出モデルのパラメータで調整していることが原因と考えられる。

## 5 おわりに

本研究では、豪雪地帯の貯水池操作の合理化を目的として、夜間流入量の予測を試みた。具体的には、予測の対象としている17時以降の夜間融雪量が、予測開始時点で既に計算可能な融雪量で構成されていること、短期間では積雪域の変動や流域の湿潤状態の変動が小さいものと考え、前日の実績資料から推定した流出モデルのパラメータを使って当日の計算融雪量で夜間の融雪流出量を予測するものである。対象流域で予測計算を行った結果、前日の融雪量が予測日当日とほぼ同等の場合には、予測流出量は実測流出量をよく再現できることが示されたが、前日の融雪パターン

が異なる場合には、十分な予測結果が得られていない。この原因としては、流域融雪量の推定結果が十分でないこと、本来空間分布の大きい融雪量を集中型モデルで流域平均的に扱っている点などが考えられる。今後は流域融雪量の検証や採用する流出モデルの適用方法などを含めて検討が必要である。

謝辞：本研究は財団法人北海道河川防災研究センター平成17年度研究助成「豪雪地帯における貯水池の融雪流入予測に関する研究」(研究代表者：八田茂実)の援助を受けました。本研究の遂行にあたり、北海道開発局からは水文資料及び融雪観測関連資料の提供を受けました。また、星清氏(北海道河川防災研究センター)、臼谷友秀氏(北海道開発土木研究所)、中尾隆志氏(北見工業大学)からは融雪モデル、流出モデルに関して貴重なご助言を賜りました。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 八田茂実・西村哲治・藤田睦博, 豊平川支部における融雪観測とその解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 48, 479-482, 1992
- 2) 近藤純正, 水環境の気象学, 朝倉書店, 1987.
- 3) 太田岳史, 森林内外における積雪面上の純放射量の推定と表層融雪量, 水文・水資源学会会誌, 5(4), 19-26, 1992.
- 4) 山崎剛・田口文明・近藤純正, 積雪のある森林小流域における熱収支の評価, 天気, 41, 71-77, 1994.
- 5) 山口甲・長谷川茂, 融雪流出の予知に関する研究, 北海道開発局土木試験所報告, 64, 1-31, 1975.
- 6) 山田知充・西村寛・水津重雄・若濱五郎, 大雪山の積雪水量分布, 低温科学物理篇, 38, 63-71, 1979.
- 7) 小池俊雄・高橋裕・吉野昭一, 積雪面積情報による流域積雪水量の推定, 土木学会論文集, 357, 159-165, 1985.
- 8) 北海道河川防災研究センター研究所, 一般化貯留関数法による流域流出解析・河道洪水追跡実用計算法, 2001.
- 9) 北海道開発土木研究所河川研究室・北海道河川防災研究センター研究所, 対話式洪水流出計算マニュアル, 2005.
- 10) 国土交通省北海道開発局建設部河川計画課・北海道河川防災研究センター研究所, 単一流域を対象とした貯留関数法の精度比較, 2002.