

豪雪地帯における貯水池の融雪流入予測に関する研究

A Study on Snowmelt Runoff Prediction for Reservoir Operation

八田 茂実
Shigemi HATTA

苫小牧工業高等専門学校環境都市工学科助教授

要 旨

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、

- 1) 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
- 2) 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。また、本研究で採用した融雪量算定モデルは熱収支法に基づいて構成されたものであり、各種の係数も一般的な値を採用している。このため、他のダム流域への適用も容易であると考えられる。

《キーワード：融雪；流出予測；貯水池操作》

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。

融雪期の水資源管理は、融雪末期までの長期的な貯水水位の回復を目的とした水位調整、週単位程度の融雪流出量を基にした最適日放流計画、日時間単位流出量に基づく洪水処理などが考えられ、これらの基礎資料を提供する融雪流出量予測も、融雪末期までの流出量を対象とする長期予測、1週間先程度までの中期予測、数時間～1日先程度までの短期融雪流出予測に区分することができる。日々の貯水池操作に有用な中期・短期の融雪流出予測手法の構築においては、出水の原因となる融雪量とそれに伴う流出量を精度良く推定できることが重要であり、これには従来の融雪流出解析手法を利用することができる。融雪流出解析手法は、1) degree-hour 法に代表される様に、融雪に関する熱収支項の内、最も取り扱いの容易な観測資料を指標として融雪流出量を推定するものと、2) 熱収支法あるいは熱収支法に基づく融雪量算定モデルと流出モデルを組み合わせたものに大きく分類され、それぞれの手法に基づく融雪流出予測手法もいくつか提案されている (例えば品川ら¹⁾、八田ら²⁾ など)。

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、退庁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。丹波ら³⁾は、このような観点から夜間流入量の予測を試みている。しかしながら、適用する融雪モデルが熱収支法に立脚していないため、対象とする流域を変えるたびにモデルパラメータを同定する必要があるが、必ずしも実用的ではない。本研究では、これまでに提案されている熱収支法に基づく融雪モデルを用いて、多くの流域に適用可能な夜間融雪流出予測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104km²、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

融雪量は、流域内の積雪の状態や斜面向きや斜面勾配といった地形に大きく影響される。このため、融雪量の算定に当たってはこれらの量を正しく評価し、この影響を考慮できるモデルが必要となる。ここでは、現実に対象流域のダムサイトで観測されている資料(気温・相対湿度・気圧・日射量・降水量・風速)を用いて、流域全体の融雪量を推定する。

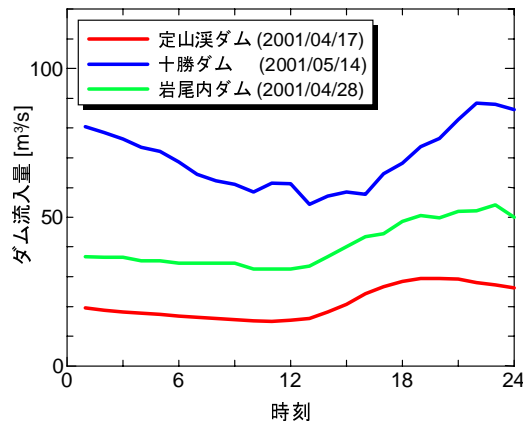


図-1 融雪期のダム流入量の日変化 (定山溪ダム・十勝ダム・岩尾内ダム;2001年)

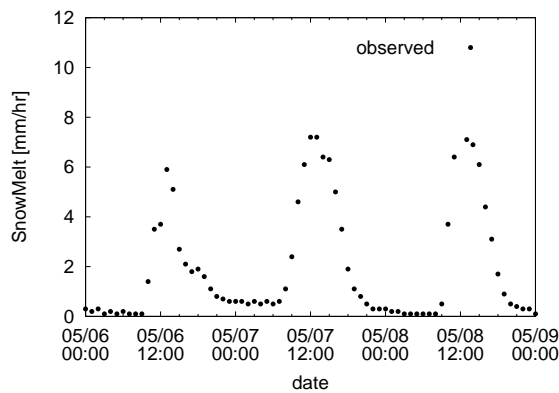


図-2 ライシメータによる観測融雪量 (定山溪ダム地点 1996年)

(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⁴⁾。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 (0.334MJ/kg) 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。

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

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

ここで、 c_p は空気の定圧比熱 ($1.05 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)、 C_H 、 C_E はバルク係数 ($1.1 \sim 1.3 \times 10^{-3}$)、 U は風速 (m/s)、 T_s 、 T_a は積雪及び空気の温度 () である。これらの量はダム管理所で収集されている気象要素を直接利用できる。尚、積雪表面温度は次式のような太田⁶⁾の実験式を採用した。

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

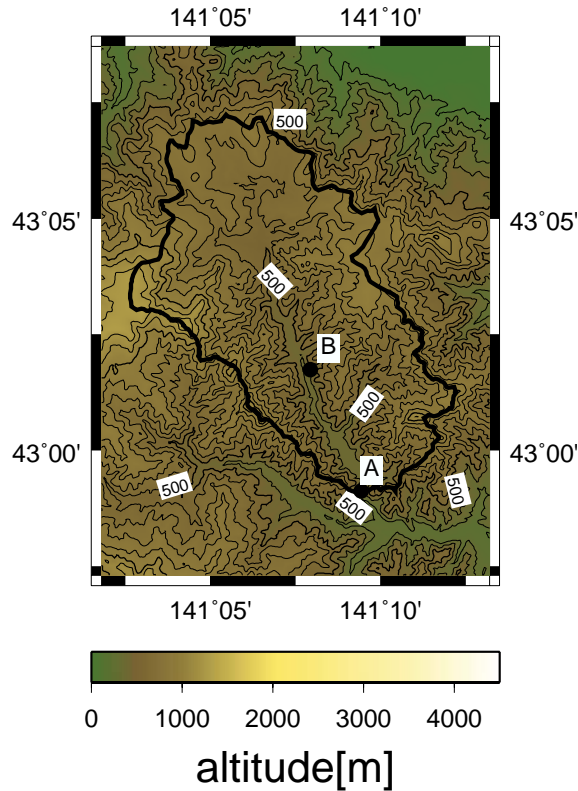


図-3 定山溪ダム流域の概要

また，顕熱交換量，潜熱交換量の式中の ρ は空気の密度 (kg/m^3)， q は比湿 (kg kg^{-1}) で，添え字の SAT は飽和時の値を意味している．これらは測定されている大気圧 p (hPa)，相対湿度の観測値にそのときの気温に対する飽和水蒸気圧 e_{SAT} を乗じて求められる水蒸気圧 e を用いて次式のように計算できる⁵⁾．

$$\rho = 1.293 \frac{273.15}{273.15 + T_a} \left(\frac{p}{1013.25} \right) (1 - 0.378e/p) \quad (6)$$

$$q_{SAT} = \frac{0.622(e_{SAT}/p)}{1 - 0.378(e_{SAT}/p)} \quad (7)$$

$$e_{SAT} = 6.1078 \times 10^{7.5T_a/(237.3+T_a)} \quad (8)$$

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．

$$Q_R = (1 - ref)I + L \downarrow - \epsilon\sigma(T_s + 273.15)^4 \quad (9)$$

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， ϵ は雪面の射出率 (0.9)， σ はステファン=ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) である．ダム管理所では日射量は測定されているが¹⁾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⁶⁾が提案している次式を用いた．

$$L \downarrow = (1 + 0.2(1 - C_c))(0.51 + 0.066\sqrt{\epsilon}) \times \sigma(T_a + 273.15)^4 \quad (10)$$

$$C_c = (I/I_0)/F \quad (11)$$

¹⁾ 日射量が観測されていない場合は，日照時間を用いて日射量を推定する経験式が提案されている．しかし，この式で求められる日射量の推定精度は低い．

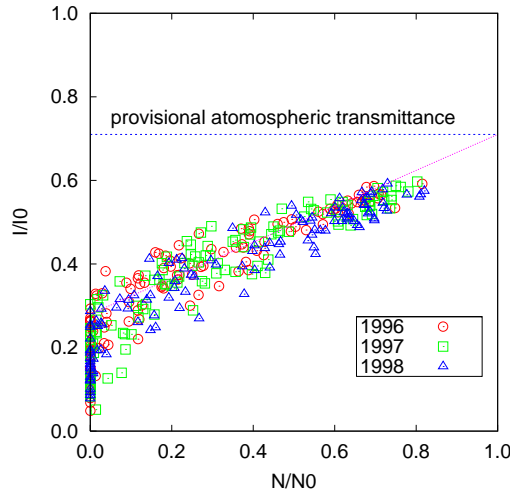


図-4 日照率 (N/N0) と日射量の比 (I/I0) の関係 (1996 ~ 98 年 ; 札幌)

ここで, e は水蒸気圧 (hPa), I_0 は大気外の日射量, F は見かけの大気透過率で, 日照率 (可照時間に対する日照時間の比) が 1 のときの大气外放射量に対する全天日射量の比で表される. 図-4は 1996 年から 1998 年の札幌で観測されている日射量と日照時間から日照率と大気外放射量に対する日射量の比を示したものであり, この結果から見かけの大気透過率を 0.71 と設定した. また, 大気外の日射量は次式により計算される.

$$I_0 = \frac{I_{00}}{\pi} \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 (H \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin H) \quad (12)$$

$$H = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (13)$$

$$\left(\frac{d_0}{d} \right)^2 = 1.00011 + 0.034221 \cos \eta + 0.00128 \sin \eta + 0.000719 \cos 2\eta \quad (14)$$

$$+ 0.000077 \sin 2\eta$$

$$\eta = (2\pi/365) \times DOY \quad (15)$$

ここで, I_{00} は太陽定数 (1365 W m^{-2}), ϕ は地点緯度, δ は太陽赤緯, DOY は 1 月 1 日からの日数, H は日の出から太陽南中時の時角²である.

また, 雪面アルベドの推定には山崎ら⁷⁾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.

$$ref_0 = ref_{max} \quad (16)$$

$$ref_n = (ref_{n-1} - ref_{min} \exp(-\frac{1}{k}) + ref_{min} \quad (17)$$

$$ref_{max} = \begin{cases} -0.12T_a + 0.76 & (T_a \geq 0.1^\circ\text{C}) \\ 0.88 & (T_a < 0.1^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (18)$$

$$k = \begin{cases} -4.9T_a + 4.5 & (T_a \leq 0.1^\circ\text{C}) \\ 4.0 & (T_a > 0.1^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (19)$$

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} は雪面の最大・最小アルベドで, 本研究では $ref_{max} = 0.88, ref_{min} = 0.4$ を採用した.

図-5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, ダムサイトのデータを正味放射量モデルに与えて計算した結果を示したものである. また, 図-6はダムサイトのデータを用いて計

² 日照率を計算する際に必要となる可照時間は H を 2 倍して日の出から日の入りまでの時角とし, 地球の自転の速度 ($2\pi/24 \text{ rad/hr}$) から時間に変換することで求められる. (式 (27) を参照)

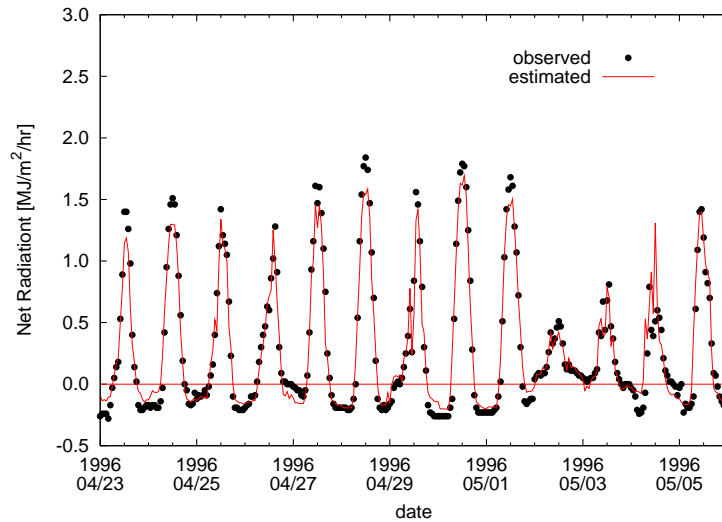


図-5 正味放射モデルによる計算結果 (定山溪ダム地点 1996 年)

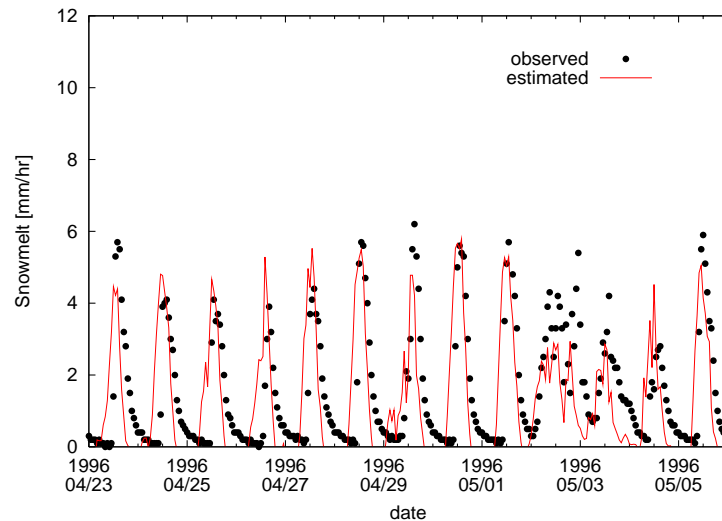


図-6 熱収支法による融雪量の算定結果 (定山溪ダム地点 1996 年)

算された B 地点の融雪量と実際に B 地点の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、これまでに示した融雪モデルが妥当であることが確認できる。

(2) 流域内の融雪量の推定

ここまでに示した式 (1) ~ (19) 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。

(a) 積雪水量の空間分布

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^{8),9)}、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-7は定山溪ダム流域の 1996 年の積雪調査

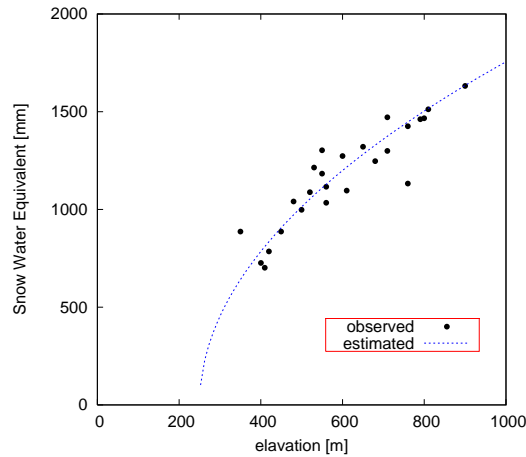


図-7 積雪水量と標高の関係 (定山溪ダム 1996 年)

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。

$$SWE(h) = a_1(h - h_0)^{a_2} \quad (20)$$

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、総融雪量が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。

(b) 融雪量の分布

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 $\gamma (= -0.006 \text{ /m})$ を用いて補正した。気象観測点の標高と気温を H_0, T_a とすると、任意標高 H の気温 T_H は次式のように表される。

$$T_H = T_a + \gamma(H - H_0) \quad (21)$$

一方、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 α (南向きを正、北向きを負とする)、斜面の向き χ (真北・真南からの角度)、太陽高度 β 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¹⁰⁾。受光係数 SC は、次式のように表わされる。

$$SC = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cos \chi}{\tan \beta} \quad (22)$$

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 から次式のように求めることができる。

$$I_N = \frac{SC_N}{SC_0} I \quad (23)$$

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。

本研究では、国土数値情報の 50m メッシュ標高データを用いて対象流域の流域地形モデルを作成している。融雪量は 50m メッシュ単位で計算をすることとし、受光係数の算定に必要な α, χ を求めたうえで、メッシュ内の気温補正・日射量補正を行い、前節に示したモデルにこれらの値を代入して融雪量を算定している。なお、メッシュ標高データから斜面特性量を求める方法は、成書¹¹⁾に譲るのでそちらを参考にされたい。

(c) 推定された流域平均融雪量の適合性

以上のようにして、流域内の融雪量はメッシュごとに求められる。本来であれば、各メッシュの融雪量を観測値に基づいて検証すべきであるが、観測資料がないため、ここでは各メッシュで計算された融雪量の流域平均値(流域平均融雪量)と、水収支的に得られた流域融雪量の比較を行った。

時刻 t_1 から t_2 までの流域平均融雪量 ΣM は、この期間の総流出量 ΣQ 、総蒸発散量 ΣE 、総降水量 ΣR と、流域貯留量の増分 ΔS を用いて次式のような水収支式より求めることができる。

$$\Sigma M = \Delta S + \Sigma Q + \Sigma E - \Sigma R \quad (24)$$

式(24)を適用する際、対象期間の流域貯留量の増分を求めることが問題となる。融雪期間中はハイドログラフが1日周期で変動し、毎日似たような洪水波形が得られることが多い。このため、1日のうちの低水時には洪水は継続しているものの、流域の状態に大きな変動はないと考えられる。このため、水収支式を適用する期間の開始を1日のうちの低水時にとり、期間の終了を開始時の流量とほぼ同程度の低水部分を持った時刻にとれば、流域貯留量の増分 ΔS を0とみなせるものとした。このような期間を選ぶことにより、式(24)は次式のように簡略化できる。

$$\Sigma M = \Sigma Q + \Sigma E - \Sigma R \quad (25)$$

尚、蒸発散量は次式に示す Hamon 式を用いることとした。

$$E = 0.14N_0^2 H_a \quad (26)$$

$$N_0 = \frac{2H}{0.2618} \quad (27)$$

ここで、 N_0 は日照時間、 H_a は飽和絶対湿度、 H は太陽南中時の時角(式(13)参照)である。飽和絶対湿度は次式より算出する。

$$H_a = \frac{0.804}{(1 + 0.00366T_a)} \frac{e_{SAT}}{p} \quad (28)$$

ここで、 T_0 、 e_{SAT} 、 p はそれぞれ気温、飽和水蒸気圧、大気圧である。

モデルで計算されるある期間の流域平均融雪量 (M_{cal}) と水収支法により推定した流域平均融雪量 (M_{cal0}) の比較結果を図-8に示す。図のように、水収支で求めた融雪量と推定融雪量はほぼ一致しており、モデルにより計算された融雪量は妥当であると言える。しかし、融雪前期には過小、融雪後期には過大評価となることが多い。主な原因として融雪前期は融雪開始日の不良、融雪後期は推定した初期積雪水量が現実のものよりも多く見積もられたことが考えられる。

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流入されるため、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-9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。

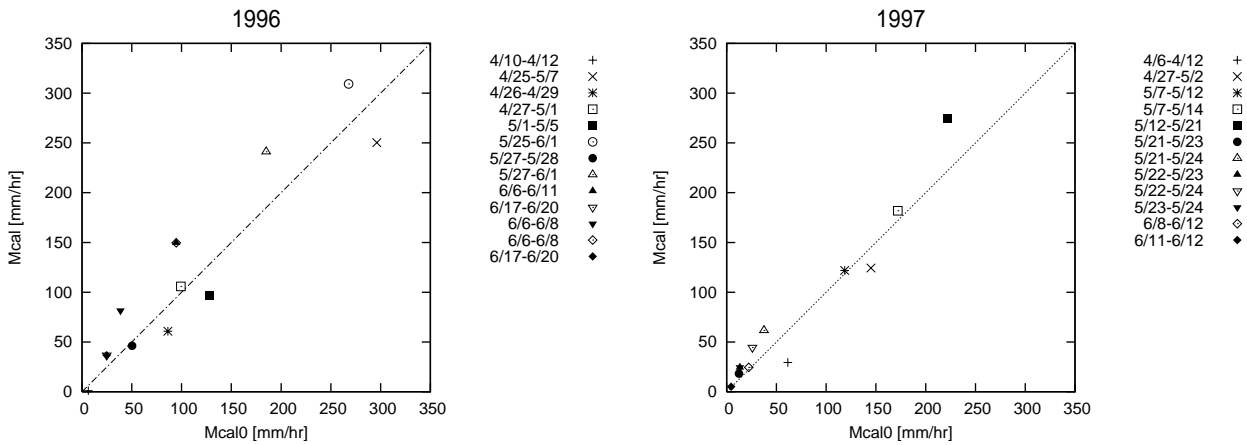


図-8 流域融雪量の適合性 (1996, 1997 年融雪期)

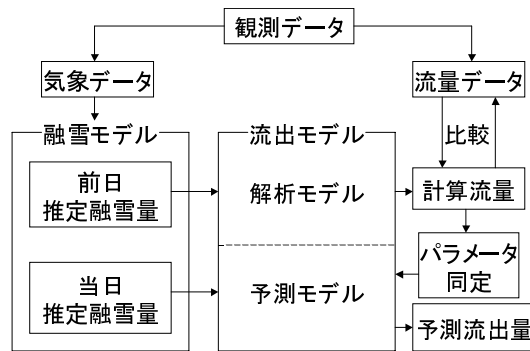


図-9 モデルによる融雪流出予測の手順

(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¹²⁾。

$$s = k_{11}q^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \quad (29)$$

$$\frac{ds}{dt} = r - q - b + q_b \quad (30)$$

$$b = (c_3 - 1)q \quad (31)$$

$$q_b = q_{in} \exp(-\lambda t) \quad (32)$$

また、

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

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

$$p_1 = 0.6$$

$$p_2 = 0.4648$$

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, λ は

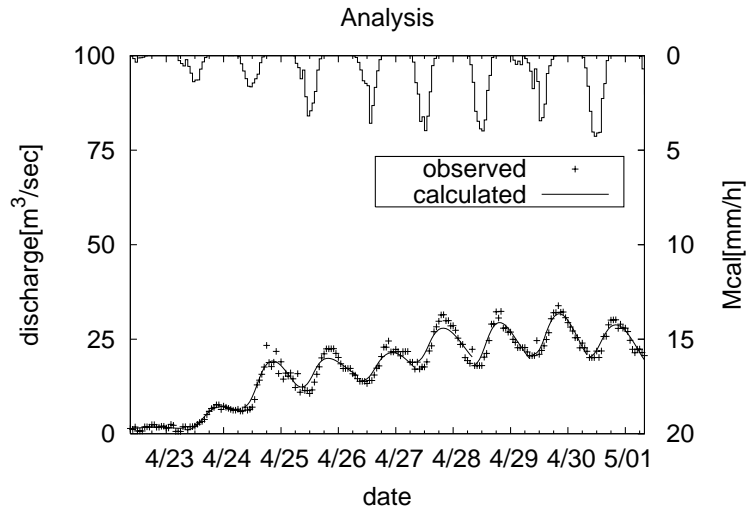


図-10 融雪流出量の算定 (定山溪ダム地点 1996 年)

減衰係数, A は流域面積 (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¹²⁾. 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^{13),14)} を用いた.

(2) 流出予測結果

図-10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-11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, 降雨を含めた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である.

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. 本研究で採用した融雪量算定モデルは熱収支法に基づいて構成されたものであり, 各種の係数も一般的な値を採用している. このため, 他のダム流域への適用も容易であると考えられる. 今後は, 他の流域への適用例を増やし, その精度の検証と適用が困難な場合を明らかにするとともに, 計算に用いるプログラムを整備・公開を進める予定である.

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

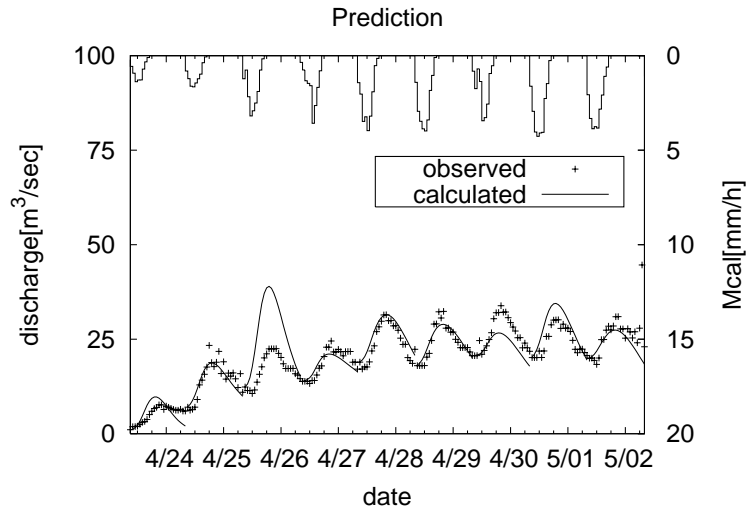


図-11 夜間融雪流出量の予測 (定山溪ダム地点 1996 年)

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 (日本気象協会北海道支社)、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) 品川守・木村武雄・解田哲雄, 融雪期の洪水予測について, 北海道開発局技術研究発表会論文集,
- 2) 八田茂実・西村哲治・藤田睦博, 融雪流出予測における週間気象予報の利用について, 水工学論文集, 37, 141-146, 1993. 803-812, 1981.
- 3) 丹羽薫・盛谷明弘, ダム流入量予測のための融雪流出のモデル化, 建設省土木研究所資料, 2826, 1990.
- 4) 八田茂実・西村哲治・藤田睦博, 豊平川支流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.
- 5) 近藤純正, 水環境の気象学, 朝倉書店, 1987.
- 6) 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・水資源学会学会誌, 5(4), 19-26, 1992.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 水理公式集例題プログラム集
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.