

II-20

熱収支法による融雪出水予測

北海道開発局開発土木研究所 正員 中津川 誠
 北海道開発局開発土木研究所 正員 藤田 満士
 北海道開発局開発土木研究所 正員 星 清

1. はじめに

積雪寒冷地において、春先の融雪量を把握し、予測することはダムや河川管理にとって重要な課題である。とくに、防災面では時間ごとの融雪流出量を把握し、融雪出水に対処することが必要である。時間融雪量を的確に推定するには積雪層の熱収支を考慮する必要がある、その方向性に沿って、様々なモデルが提案されているが、流域スケールで普遍的に実用化される手法の開発が望まれる。本報告においては、定山溪ダムの上流にある滝の沢川流域(11.8km²)を対象として、熱収支を考慮して推算された融雪が積雪層内を浸透して河川に流出するまでの過程をモデリングしている。また、夏期における降雨流出関係が融雪期にも適用できるとして、流量データから融雪量を逆推定し、それから融雪モデルのパラメータを調整している。以上で推定された融雪量から、現状で実用化されている一般化貯留関数とカルマンフィルターを用いた手法によって数時間先までの流出予測をおこなった。

2. 融雪流出に関する観測およびモデルの概要

(1) 現地観測

融雪流出モデルの検証をおこなうため、北海道札幌市の南部にある定山溪ダム流域内において各種観測を実施した。観測箇所的位置を図-1に示す。融雪モデルの構築のため、ダムの流木処理施設内で融雪期においてスノーライシメータによる融雪量観測のほか、積雪深、雪温、気温、湿度、全天日射、反射日射、放射収支、風向風速の計測を毎時間おこなった。また、河川への融雪流出量を推定、検証するため、ダムの流入河川である滝の沢川流域(流域面積11.8km²)を解析の対象とした。ここでは、砂防ダムの湛水部に圧力感知式の水位計を設置し、その計測データから流量に換算した。このほか、流域全体における積雪水量については空中写真による手法¹⁾を用いた。

(2) 表面融雪量 q_M の推定

積雪寒冷地での融雪流出は、図-2に模式的に示すように(1)積雪表面での融雪、(2)融雪水の積雪内への浸透、(3)土壌表面に達した水の河川流出の過程を経るが、最初に積雪表面の融雪量の推定をおこなうため、Kondo and Yamazakiによって提案されたモデル²⁾を用いた。

これは積雪層内のエネルギー収支と積雪表面の熱フラックスを考慮し、融雪量、積雪表面温度、凍結深を同時に解く手法で、基礎式は次のとおりである。

$$\frac{1}{2}c_s\rho_s[Z(T_0 - T_s) - Z_n(T_0 - T_{sn})] + W_0\rho_s l_f(Z - Z_n) + M_0\Delta t = G\Delta t \tag{1}$$

$$\varepsilon(L \downarrow - \sigma T^4) - (4\varepsilon\sigma T^3 + C_p\rho C_H u + l_p C_E u \Delta)(T_{sn} - T) - l_p C_E u(1 - h)q_s(T) + \lambda_s \frac{T_0 - T_{sn}}{Z_n} = 0 \tag{2}$$

$$G = R_n - H - lE = (1 - \alpha)S + \varepsilon(L \downarrow - \sigma T_s^4) - H - lE \tag{3}$$

定山溪ダム流域

(104km²)

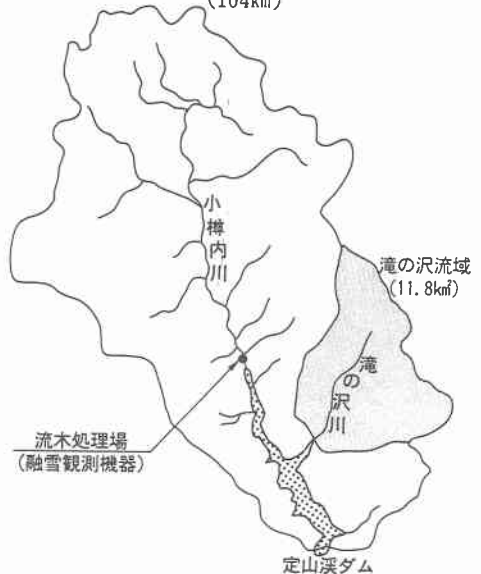


図-1 観測箇所の位置図

ここで、式(1)は Δt 時間で凍結深が Z から Z_n 、積雪表面温度が T_s から T_{sn} になったとして、その間のエネルギー収支をあらわしたもので、式(2)は厚さ無限小の積雪面の熱収支をあらわしたものである。なお、 c_s 、 ρ_s は積雪の比熱と密度、 $T_0 = 0^\circ\text{C}$ 、 l_f は融解潜熱、 W_0 は積雪含水率、 M_0 は融雪エネルギー、 G は大気から積雪表面へ与えられるエネルギー、 ε は射出率、 $L \downarrow$ は下向き長波放射量、 σ はStefan-Boltzmann定数、 T は気温、 C_p は定圧比熱、 ρ は空気密度、 l は蒸発潜熱、 u は風速、 C_H 、 C_E は顕熱、潜熱のバルク係数、 $\Delta = \partial q_s / \partial T$ 、 h は相対湿度、 q_s は飽和比湿、 λ_s は積雪の熱伝導率、 R_n は放射収支量、 α は積雪表面のアルベド、 S は全天日射量、 H は顕熱量、 LE は潜熱量をあらわす。このうち、積雪密度、アルベド、下向き長波放射量は気温や相対湿度でパラメタライズ³⁾される。結局、上式から得られる融雪エネルギー M_0 を融解潜熱、水の密度で除して融雪量 q_M を求める。

(3) 融雪浸透量 q_F の推定

融雪が積雪表面で生じた後、浸透して地面に到達する現象は、貯留効果を考慮し、次のように表現する。

$$\frac{ds}{dt} = q_M + q_R - q_F, \quad s = kq_F^p \quad (4)$$

ここで、 s は貯留量、 q_M 、 q_R 、 q_F は、それぞれ表面融雪量、降雨量、浸透後の地面に到達する水（融雪浸透量）、 k 、 p は貯留関数のパラメータをあらわす。これらのパラメータは雪量・雪質の変化とともに、推移するとして簡便に気温によってパラメタライズ³⁾した。図-3には上記によって算定された q_F とスノーライシメータによる実測値を示す。

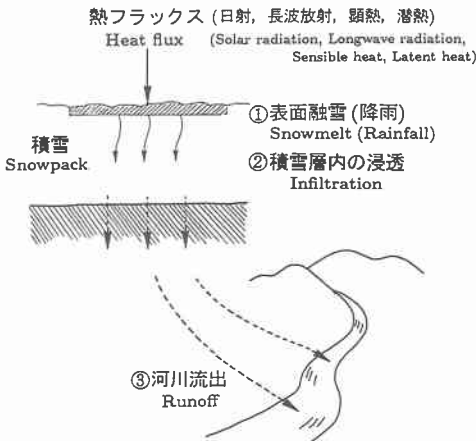


図-2 融雪流出過程の模式図

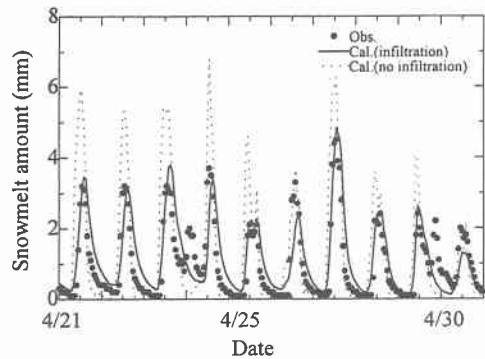


図-3 融雪量の実測値と計算値(1994)

(4) 河川への融雪流出量 q の推定

流域全体の融雪量の推定にあたり、日射量、湿度、風速は流木処理場で測定されたものをそのまま、気温は標高補正して与える。最終的に河川へ流出する成分は、このように融雪量を推定した上で、次式のような一般化貯留関数によって推算する。

$$\frac{ds}{dt} = q_F - q, \quad s = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt} (q^{p_2}) \quad (5)$$

ここで、 k_1 、 k_2 、 p_1 、 p_2 はパラメータ、 q は流量をあらわす。

3. 流量データからの融雪量の逆推定とモデルパラメータの調整

上記で示したように熱収支法については、いくつかのパラメータがあるが、これを流域の唯一の積分値である流量データから調整することを考える。実流域の融雪には熱収支や浸透における樹木の効果が複合的に影響していると考えられる。そのうちのひとつとして、次に示すように樹木による日射の遮蔽と輻射の効果⁴⁾がある。

$$S_{fo} = X_\theta S, \quad L_{fo} \downarrow = (1 - X) \sigma T_c^4 + X L \downarrow \quad (6)$$

ここで、 S_{fo} 、 $L_{fo} \downarrow$ は林内の全天日射量および下向き長波放射量、 S 、 $L \downarrow$ は森林上端の全天日射量および長波放射量、 X_θ は日射の透過率、 X は長波放射の透過率で $X \approx X_\theta$ 、 T_c は葉面温度で $T_c \approx T$ とする。また、種々の条

件で融雪水の浸透速度も変わってくると考えられることから、浸透貯留のパラメータ k も調整する必要がある。結局パラメータ X と k を流域代表値としてチューニングすることを考える。

ところで、(積雪浸透後の)融雪に対する河川流量の応答は、ケースにもよるが、基本的に降雨に対するものと同一であると仮定できる。この考え方は、成分分離AR法の適用によって、夏期のAR関数で融雪期のハイドログラフが再現できることで立証されている⁵⁾。今回は、一般化貯留関数を適用し、夏期のデータから k_1, k_2 を求め(p_1, p_2 は固定)、融雪期には、次の差分式で流量データから逆に(相当)融雪量を推定した。

$$q_{F_{eq}} = q + \frac{\Delta s_F}{\Delta t}, \quad s_F = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{\Delta}{\Delta t} (q^{p_2}) \quad (7)$$

ここで、 $q_{F_{eq}}$ は逆推定された(相当)融雪量で、これを再現し得るような最適なパラメータを求めていく。図-4にはこのようにしてチューニングされたパラメータ($X = 0.8$, k は積算暖度の関数)を用いて再現した融雪期の河川流出量を、デグリーアワー法の結果とともに示す。

1) デグリーアワー法

2) 熱収支法

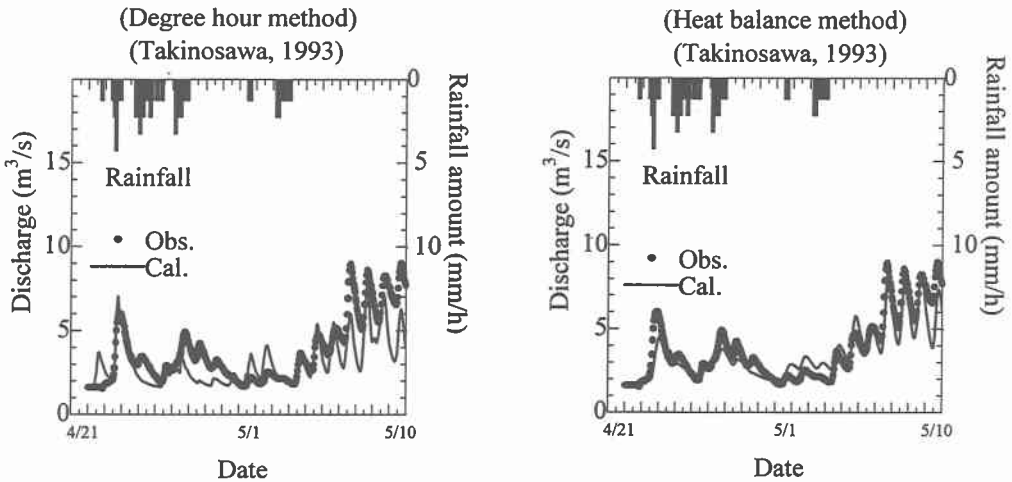


図-4 融雪流出量の再現結果(1993)

4. 融雪流出の予測結果

流出予測計算に先だって融雪量そのものを推算する必要があるが、その際必要となるのは気温、日射量、湿度、風速の4要素である。この中で気温については、過去24時間のデータから下式のようなフーリエ関数を同定し、時間外挿によって予測値を求めた。また、日射量については、現時点での日照率が数時間先まで続くとして、それを快晴時の日射量に乗じて求めた。

$$T(t) = a_0 + a_1 t + a_2 \sin\left(\frac{2\pi}{24}t\right) + a_3 \cos\left(\frac{2\pi}{24}t\right) + a_4 \sin\left(\frac{4\pi}{24}t\right) + a_5 \cos\left(\frac{4\pi}{24}t\right) \quad (8)$$

$$S(t) = S_0(t) \frac{S_o(t - \Delta t)}{S_0(t - \Delta t)}, \quad S_0 = I_{00} \left(\frac{d_0}{d}\right) (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h) \quad (9)$$

ここで、 S_o は実測全天日射量、 S_0 は大気上端日射量、 I_{00} は太陽定数、 d_0 は地球離心率、 ϕ は緯度、 δ は赤緯、 h は時角をあらわす。このほか、湿度と風速については現時点の値を将来ともそのまま用いた。これによって設定された熱収支に基づいて融雪量を算出した後、一般化貯留関数(式(5))とカルマンフィルタ⁶⁾によって流出予測をおこなった。図-5には、以上のようにして3時間先まで予測した融雪期の流出量を示す。

以上の結果から、熱収支をベースとした物理的なモデルを構築しつつ、そのパラメータを流域全体の積分値である流量データでチューニングすれば融雪期を通した汎用的な融雪流出量の評価も可能であると考えられる。なお、流出予測手法は、現在北海道開発局で降雨流出予測のために実用化されているものと同じなので、今回示

したような融雪予測を組み込むことで通年の適用が可能となるであろう。融雪流出量の算定に至る作業手順を図-6にフローチャートとしてまとめておく。

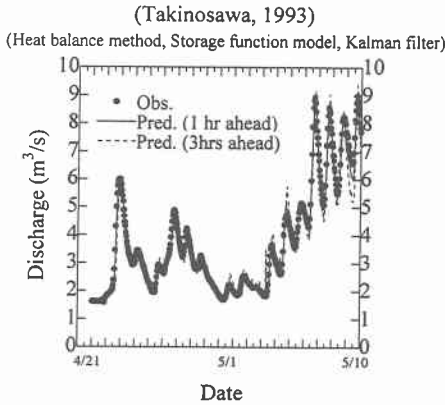


図-5 融雪流出量の再現結果(1993)

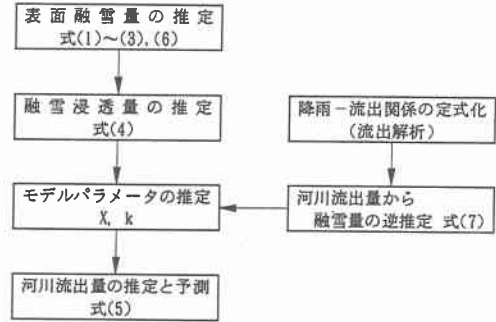


図-6 流域融雪流出量算定の手順

5. おわりに

本研究では、積雪寒冷地の流域を対象に現業的な時間融雪流出モデルの開発を目指し、今回報告したことをまとめると、(1)熱収支を考慮した表面融雪と、貯留効果を考慮した融雪浸透をモデル化した。(2)河川流量データから逆推定した融雪量で流域平均的なモデルパラメータを決定し、融雪流出量の再現をおこなった。(3)一般化貯留関数とカルマンフィルターを用いて数時間先までの流出予測をおこなった。

現在、流域気象・水文情報の充実化により、ダム管理所やアメダスで通常計測されているような情報で、今回提案したような手順(図-6)をベースとした融雪予測が現業化できると考えられる。今後の課題として、モデルパラメータや流出モデルの汎用化、さらには予測リードタイムの拡大を目指していきたい。

なお、今回の観測に際し、施設の利用等に便宜を図っていただいた石狩川開発建設部豊平川ダム統合管理事務所の関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 中津川誠, 星清, 山口昌志, 1994; 流出パターンを反映した流域融雪モデルの構築, 平成6年度水文・水資源学会研究発表会要旨集, 328-329.
- 2) Kondo, J. and T. Yamazaki, 1990; A prediction model for snowmelt, snow surface temperature and freezing depth using a heat balance method, *J. Appl. Meteor.*, **29**, 375-384.
- 3) 中津川誠, 星清, 1995; 熱収支を考慮した流域スケールの時間融雪流出量の推定, 北海道開発局開発土木研究所月報, **506**, 2-9.
- 4) Yamazaki, T. and J. Kondo, 1992; The snow-melt and heat balance in snow-covered forested area, *J. Appl. Meteor.*, **31**, 1322-1327.
- 5) 山口昌志, 藤田満士, 中津川誠, 1995; 流域スケールにおける時間融雪量の推定, 土木学会年次学術講演会講演概要集第2部(A), **50**, 56-57.
- 6) 星清, 1985; 洪水予測システムの基礎的検討(2), 北海道開発局土木試験所月報, **386**, 48-68.