

積雪貯留を考慮した汎用的な融雪流出解析

Generalized Analysis of Runoff Due to Snowmelt Considering Storage of Accumulated Snow

中津川 誠¹・工藤 啓介²・星 清³

Makoto NAKATSUGAWA, Keisuke KUDO and Kiyoshi HOSHI

¹正会員 博士 (工学) 独立行政法人 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²正会員 株式会社 ドーコン (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

³フェロー会員 工博 (財) 北海道河川防災研究センター (〒060-0042 札幌市中央区大通西1丁目)

To facilitate flood prediction and water-resource management, this study examines a method of modeling the storage effect of accumulated snow for the entire watershed. To achieve this, it is necessary to take into account the time lag as a factor depending on the state of accumulated snow.

We found that the constantly changing storage effect can be parameterized simply, based on the depth of accumulated snow as calculated by long-term hydrologic model. Outflow at the lower surface supplied by infiltration of melt water from the upper surface is then applied to runoff calculation. Reduction in snow accumulation, early onset of snowmelt period and anomalous rainfall patterns due to climatic changes have been concerns in recent years. An attempt was made to propose a generalized runoff model that can be applied under any conditions in cold, snowy regions

Key Words : *Storage effect of accumulated snow, Melt water on the snow upper surface, Outflow from the snow lower surface, Storage routing*

1. はじめに

融雪流出量を推定するため、簡便な積算暖度法から熱収支法に至るまで多くの方法が提案されてきた。ところで、実際には積雪表面で融雪が生じた後、浸透を経て底面に達するまでに時間遅れが生じる。つまり、積雪にも土壌と同様の貯留効果があり、それは積雪の状態に応じて変化するとみることができる。しかるに、積雪の状態に応じた貯留効果については、最近では石井¹⁾が雪質と浸透速度の関係を考察しているほか、モデルとしては Colbeck²⁾がDarcy則に基づく不飽和浸透流を導入した例や、山崎ら³⁾が積雪の変成過程を含めて総合化した例、Marsh *et. al.*⁴⁾が積雪の非一様性を考慮した例などがあり、理論的には多くの方法論が展開されている。

しかしながら、洪水予測や水資源管理といった実用上の用途からは、流域全体を対象とした積雪貯留効果のモデル化が必要であり、それを簡便におこなえる手法は今もってみあたらない。現実には、2000年の融雪期に北海道の豊平峡ダム流域で、時期はずれの豪雨が積雪の違いで全く異なる流出をもたらした例⁵⁾がある。そのような事象を的確に再現するには、積雪のもつ貯留効果を流域全体でモデル化する必要がある。

本研究においては、Kondo *et. al.*⁶⁾によって提案された熱収支法から積雪表面融雪量を推算するとともに、ライシ

メータ観測で得られた積雪底面流出量から貯留効果を確認し、Darcy則に基づく浸透モデルを適用した。さらに、流域全体の貯留効果については、以下の手段で定式化することを試みた。

- 1) 標高、斜面方向に応じ、熱収支法によって積雪表面融雪量を推算する。
- 2) 積雪の貯留効果を積雪深によってパラメタライズする。これによって積雪深に応じた積雪表面融雪量に対する積雪底面流出量を推算する。
- 3) 流域の積雪深は、後述する「長期水・熱収支モデル」から推算したものをを用いる。

ところで、流域の積雪の状態(積雪深、積雪水量)については、貯留効果を表現するための変数として与える必要がある。この際に、降水量、蒸発散量、流出量が的確に推定でき、長期的な水収支を担保できるようなモデルが必要となってくる。このために、植生の効果が考慮できる近藤ら⁸⁾の2層モデルに基づいて、長期水・熱収支を計算する手法(中津川ら⁹⁾)が提案されており、その結果を用いた。また、流出モデルについては、治水計画や洪水予測といった実用性を鑑みると、パラメータのチューニングが容易なモデルが有利である。そこで、水収支を明確にしつつ、非線形性の強い洪水流出をあらわすために提案された2段タンク型貯留関数¹⁰⁾を適用する。これは、積雪貯留効果を考慮しなければ降雨流出モデル

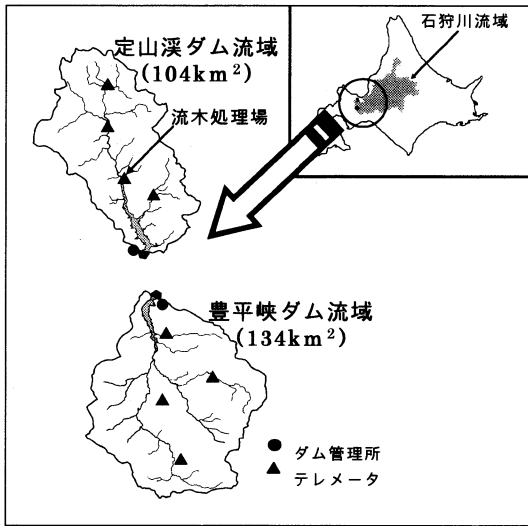


図-1 解析対象箇所

として用いることができる。

以上によって、100km²程度の実流域を対象に、積雪の状態に応じた融雪洪水時の流出量を推算した。近年の気候変動により、積雪の減少、融雪の早まり、季節はずれの集中豪雨などが懸念されている。そのような状況を背景に、本研究では積雪寒冷地のすべての状況に対応可能な流出モデルの構築を目指すものである。さらに、融雪流出量の推定は、ダム管理所などでルーチ的に計測されているデータや一般的な地形データさえあれば可能であり、他の流域にも十分適用していけると考える。

2. 積雪の表面と底面における流出について

北海道札幌市の南部にある定山溪ダム（位置は図-1参照）の流木処理施設内露場で融雪に関わる観測を実施した例¹¹⁾がある。ここでは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、風向風速の計測がおこなわれた。ここで得られたデータから積雪表面融雪量を推定し、ライシメータによって計測された積雪底面流出量と照合し、積雪の貯留効果について解析する。

(1) 積雪表面融雪量と積雪底面流出量

積雪表面の融雪量は、熱フラックスに関わる観測データを熱収支モデル (Kondo *et al.*⁶⁾) に適用して推算する。モデルは積雪層内のエネルギー収支と積雪表面の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ことができる。基礎式は次のとおりである。

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

$$G = (1 - \alpha) S + \varepsilon (L \downarrow - \sigma T^4) - H - IE \quad (2)$$

$$\varepsilon (L \downarrow - \sigma T_{sn}^4) - H - IE + \lambda_s \frac{T_0 - T_{sn}}{Z_n} = 0 \quad (3)$$

ここで、式(1)は時間 Δt で凍結深が Z (m)から Z_n (m)、積雪表面温度が T_s (°C)から T_{sn} (°C)になったとして、その間のエネルギー収支を、式(3)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(J/kg/K)と密度(kg/m³)、 T_0 は0°C、 l_f は融解潜熱(J/kg)、 W_0 は積雪の最大含水率、 M_0 は融雪エネルギー(W/m²)、 G は大気から積雪に与えられるエネルギー(W/m²)、 α はアルベド、 S は全天日射量(W/m²)、 $L \downarrow$ は下向き長波放射量(W/m²)、 ε は積雪面の射出率(0.97)、 σ はStefan-Boltzmann定数(W/m²/K⁴)、 T は気温(°C)、 H は顕熱量(W/m²)、 IE は潜熱量(W/m²)、 λ_s は積雪の熱伝導率(W/m/K)をあらわす。なお、顕熱量および潜熱量はバルク法により推定する。

積雪底面の流出量は、ライシメータで計測された結果を用いる。ライシメータは1m×1mのステンレス製を2基用意し、排水溝からチューブで導かれた流出水が転倒ます式雨量計で計測できるような仕組みとなっている。図-2には、積雪表面融雪量とライシメータで計測された底面流出量、および積雪深を示す。これから、積雪の十分ある融雪初期はピークが下がり、位相差も見られるのに対し、雪解けが進むに連れてピーク、位相ともに差がなくなっていく。なお、融雪初期には積雪表面の水量と底面流出が一見バランスしていないように見えるが、4月全体で降雨量+表面融雪量が382mm、底面流出量が330mmと、蒸発散を考慮すれば悪い推定ではないと考える。原因としては、融雪初期に融雪水が再凍結し、流出が持ち越されることも考えられるが、検証はできていない。また、融雪後期には、積雪があっても、ある量以下になる

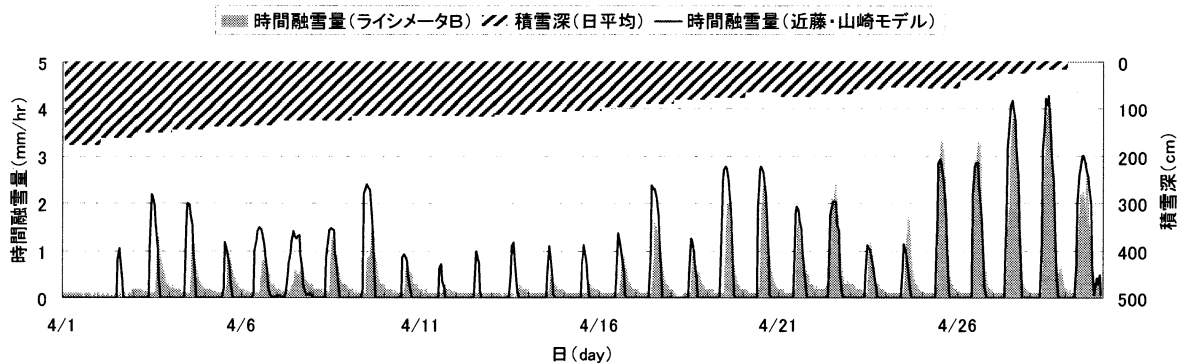


図-2 積雪表面融雪量とライシメータで計測された積雪底面流出量 (定山溪流木処理場, 1997, 4/1 1:00-4/30 24:00)

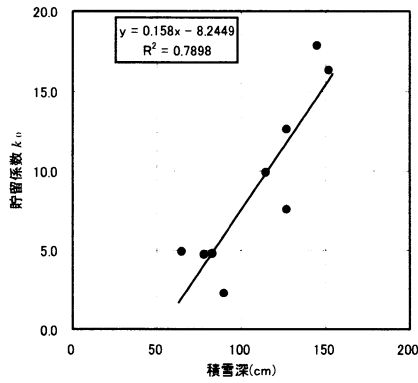


図-3 積雪深と貯留係数の関係 (流木処理場, 1997)

と、貯留効果をもたない押し出し流れのような状態となるようにもみえる。それらのことを以下の方法によって定式化する。

(2) 積雪貯留効果の定式化

積雪内の融雪水流下フラックスの推定に対しては、Colbeck²⁾が提案しているような不飽和鉛直流動に基づく理論が代表的であるが、ここでは簡便化のため、基本的なDarcy則 (飽和浸透) を適用する。単位面積あたりの流下フラックス q_0 (m/s)は、積雪深 H_s (m)、積雪間隙水の水頭差 Δh (m)および透水係数 K_{0w} (m/s)で表せる。

$$q_0 = K_{0w} \frac{\Delta h}{H_s} \quad (4)$$

ここで、間隙水頭差 Δh が積雪層の貯留量 s_0 と関連すると考えると、貯留効果をもたない積雪層厚 H_{s0} を導入する。これは、地熱供給のある積雪層下部などで浸透水が時間遅れなしで流下 (押し出し流れ) するような状態を想定したものである。

$$q_0 = \frac{K_{0w}}{H_s - H_{s0}} s_0 \quad (5)$$

以上より、下記のような一価の線形貯留関数を考えることとなる。

$$s_0 = (k_{01}H_s + k_{02})q_0 = k_0 q_0 \quad (6)$$

$$\frac{ds_0}{dt} = [m + r - e] - q_0 \quad (7)$$

ここで、 s_0 は積雪貯留量(mm)、 q_0 は積雪底面流出量(mm/h)、 k_{01} および k_{02} は係数で各々の単位は(h/cm)および(h)、 H_s は積雪深(cm)である。すなわち、 k_0 は積雪深でパラメタライズされる貯留係数(h)である。なお、貯留状態は雪質 (積雪密度や氷粒経など) にも関連すると考えられるが、まずは実用性を考えて積雪深のみと関連づけた場合どこまで再現できるかを試してみた。このほか、 m は積雪表面融雪量(mm/h)、 r は降雨量(mm/h)、 e は雪面蒸発量(mm/h)であるが、短期間のイベントを考える場合、雪面蒸発量を無視する。

実際には、(6)式と(7)式を連立し、いくつかのイベントで k_0 を同定し、そのときの積雪深との関係を与える回帰式を最小二乗法から見いだす。なお、積雪底面の流下フラックス q_0 は、ライシメータの観測結果より与える。

上記の方法にしたがい、1997年融雪期を対象に、積雪表面融雪量とライシメータで計測された底面流出量から貯留係数 k_0 を同定した。図-3は k_0 とその時点の積雪深の関係を示した結果であり、両者の相関性が確認された。この場合、最小二乗法から式(6)の k_{01} が0.16 (h/cm)、 k_{02} が-8.24 (h)となり、積雪深が52cm (=8.24/0.16)以下では貯留効果を考慮する必要がないことも意味する結果となった。

次に、この k_0 を積雪深に応じて求め、積雪底面融雪量を推定した結果を図-4に示す。融雪初期には積雪がなくなって流出のピークカットがみられるが、積雪の減少にともなって応答が早まる傾向を推定できている。なお、この同じパラメータで翌1998年の融雪パターンも再現できることが確認されている。以上より、積雪深だけでもおおむね貯留係数をパラメタライズできると考えた。

3. 積雪貯留効果を考慮した流域流出量の推算

前節で展開した方法論に基づき、流域スケールで積雪貯留を考慮した融雪流出モデルを考える。モデル構成としては、図-5に示す以下のサブモデルからなる。

- 1) 熱収支法に基づく積雪表面融雪モデル
- 2) 貯留関数法に基づく積雪浸透モデル
- 3) 2段タンク型貯留関数法に基づく流出モデル

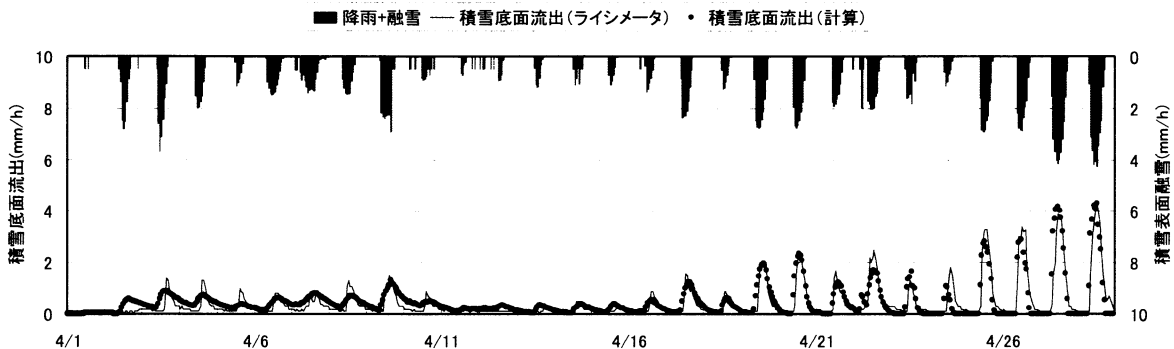


図-4 積雪表面融雪と積雪底面流出 (定山溪流木処理場, 1997, 4/1 1:00-4/30 24:00)

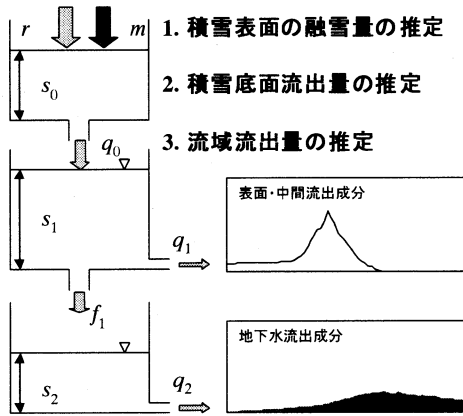


図-5 流域流出量推定のためのモデル構成

(1) 熱収支法による積雪表面融雪量の推算

流域単位の融雪量は、地形や植生、気象要素の空間分布に左右される。そこで、流域全体に熱収支モデルを適用し時間単位の計算をおこなうには、補正を行う必要がある。ここでは、熱フラックスの補正をメッシュ単位でおこなう。ただし、その際の積雪表面融雪モデルは基本的には(1)~(3)式に示したものと同様である。

まずは、熱フラックスに植生が与える影響を考慮する。そのため、(2)式に示される入力熱エネルギー G を次式によって推定する。

$$G = f_v[(1-\alpha)S + \epsilon L \downarrow] + (1-f_v)\sigma T_s^4 - \epsilon\sigma T_s^4 - H - LE \quad (8)$$

$$f_v = \exp(-F \cdot LAI) \quad (9)$$

ここで、 f_v は放射に対する植被層の透過率、 F は放射に対する葉面の傾きを表すファクターでここでは0.5とした。 LAI は葉面積指標で、石井ら¹²⁾が推定したメッシュ値を用いた。

次に、式中のアルベド α は、山崎ら¹³⁾が提案している実用実験式にしたがい、日平均気温 $T(^{\circ}C)$ の関数として次のように与える。

$$\alpha = a_0 T + a_1 \quad (10)$$

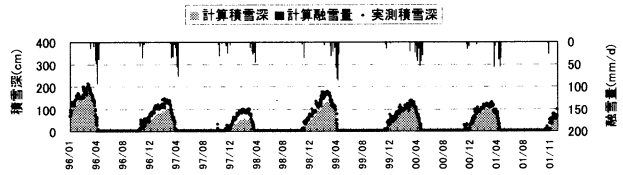
ここで、上式の係数 $a_0(=-0.020)$ および $a_1(=0.554)$ は当該地点の観測に基づいて得られたものであり、既報⁹⁾においてその再現性が確認されている。このほか、下向き長波放射量 $L \downarrow$ は近藤ら⁸⁾の方法、顕熱および潜熱はバルク法によって与える。ところで、熱フラックスは、標高や斜面方向といった地形要因にも左右される。そこで、任意個所の気温は、ダム管理所地点の観測値を減率0.65K/100mで標高補正して求めた。

このほか、日射量は中山ら¹⁴⁾および陸ら¹⁵⁾の方法を参考に、緯度方向、経度方向の傾斜を補正して求める。全天日射量 $S(W/m^2)$ は、ダム管理所で計測されている日照時間から次式で推定できる。

$$\frac{S}{S_0} = b_0 + b_1 \left(\frac{N}{N_0} \right) \quad (11)$$

ここで、 S_0 は水平面日射量(W/m^2)、 N は日照時間(hr)、 N_0 は

1) ダム管理所地点、標高485m、1996.1.1~2001.12.31



2) 大二股テレメータ地点、標高760m、1996.1.1~2001.12.31

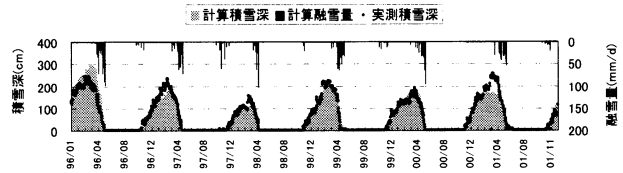


図-6 長期モデルによる積雪深の推定結果
(豊平峡ダム流域、1996.1.1-2001.12.31)

日照時間(hr)で、係数 $b_0(=0.193)$ および $b_1(=0.516)$ は当該地点の観測に基づいて得られたものである。また、 S_0 は次式で表わされる。

$$S_0 = I_{00} \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \cos \theta' \quad (12)$$

ここで、 I_{00} は大気上端での日射量(W/m^2)、 d および d_0 は太陽・地球間の距離およびその平均値、 θ' は斜面補正を施した天頂角で、次式で与えられる。

$$\cos \theta' = \cos \delta$$

$$\times [\cos \phi \cos h \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \phi \cos h \sin \theta_1 + \sin h \cos \theta_1 \sin \theta_2] + \sin \delta [\sin \phi \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \cos \phi \sin \theta_1] \quad (13)$$

ここで、 δ は太陽の赤緯(rad)、 ϕ は緯度(rad)、 h は太陽南中時からの時角(rad)、 θ_1 は南北方向の傾斜角(南向き正, rad)、 θ_2 は東西方向の傾斜角(西向き正, rad)である。

なお、もう一つの入力量である降雨量については、豊平峡ダムの場合、ダム管理所および管理用テレメータ(4箇所)で観測している結果を与えた。このほか、雪面蒸発量 e は、短期間の現象を扱うため、無視している。

(2) 貯留関数法による積雪底面流出量の推算

積雪底面の流出量については、式(6)および(7)で示される積雪貯留モデルによってメッシュ毎に推算する。また、貯留係数 k_0 は流木処理場の解析からパラメータ化したものを用いる。その際に問題となるのは、流域各所の貯留効果の特徴づける積雪深をどうやって与えるかである。そこで、既報⁹⁾の長期水・熱収支モデルで推定された積雪深を用いることとする。モデルでは、熱フラックスや降水遮断に対する森林植生の影響も考慮でき、長期的な水収支を明らかにしながら積雪の変化が推定される。言わば、その時々流出をもたらす初期条件・境界条件を妥当に与えることができる。とくに、融雪期の貯留効果を知るために、積雪状態を精度よく推定できる手法が必要であることは既述したとおりである。なお、積雪や融雪量の計算単位となるメッシュは1km×1kmとしている。

そこで、長期水・熱収支モデルで当該流域の積雪深を計算した結果を図-6に示す。計算は6カ年にわたっておこ

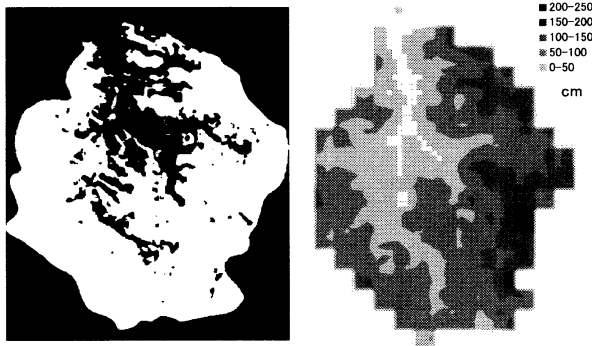


図-7 積雪域のLANDSAT画像に基づく抽出結果
(左, 白抜部分が積雪域)と計算結果(右, 積雪深分布)
(豊平峡ダム流域・2001.5.2)

ない、ダム管理所と積雪深テレメータのある大二股の結果を実測値とともに示した。これにより、長期にわたる水収支を明確にモデルに反映させれば、積雪の状態をうまく再現できることを確認した。また、図-7には積雪分布の推定結果を、同時点の衛星画像(LANDSAT-TM)で積雪域を抽出した結果とともに示す。なお、積雪域は、 $BAND3(0.63\sim 0.69\mu m)-BAND4(0.76\mu m\sim 0.90\mu m)>0$ かつ $BAND4(0.76\sim 0.90\mu m)-BAND5(1.55\mu m\sim 1.75\mu m)>0$ という条件から判別した。これから積雪分布も妥当に再現されているとみなせる。したがって、長期モデルが与える任意個所の積雪深をもって流域全体の貯留効果を定量化することは十分可能であり、実用的とも言える。

(3) 貯留関数法による流域流出量の推算

流出モデルは、下記に示す2段タンク型貯留関数を適用する。ここでは、出水時の表面・中間流出は損失項を含む非線形貯留関数によって、地下水流出は線形貯留関数によって定式化される。

$$\frac{ds_1}{dt} = q_0 - q_1 - f_1, \quad s_1 = k_{11}q_1^{p_1} + k_{12}\frac{dq_1^{p_1}}{dt}, \quad f_1 = k_{13}q_1 \quad (14)$$

$$\frac{ds_2}{dt} = f_1 - q_2, \quad s_2 = k_{21}q_2 + k_{22}\frac{dq_2}{dt} \quad (15)$$

ここで、 s は貯留量(mm)、 q は流出量(mm/h)、 f は浸透量(mm/h)、 k および p はモデルパラメータで、添え字の1および2は各々表面・中間流出および地下水流出を意味する。また、パラメータは、成分分離法とNewton-Raphson法から導いた数学的最適化手法に基づき与えた。

ところで、融雪期や長雨が続いた後で流域がウエットな場合、雨が降り止んでもしばらく高い流出が続くことがある。つまり、降雨と流出の水収支が担保されていないステージだけを取り出しても、再現性のよいパラメータが見いだせない大きな原因はそこにある。苦肉の策で「流出率」を導入し、その決め方を模索してきた経緯もあるが、当然のごとくそれもイベント毎に変化する要素である。上記モデルは地下水流出に至る貯留を考慮することで、入出力の収支を明確にしつつ、より普遍的なパラ

メータを求めることを目指すものである。

(4) 流域流出量の計算結果と考察

融雪、積雪貯留といった過程を踏まえ、豊平峡ダム流域の流出量を計算した結果を図-8に示す。ここで例とした2000年の融雪期は、3度の豪雨に見舞われている。このうち、4月21日1:00から23日24:00までの3日間に168mmの雨が降ったケースでは、融雪量を合わせた入力量が200mm、総流出高が101mm、ピーク流量が211m³/sであった。一方、5月11日1:00から13日24:00までの3日間に102mmの雨が降ったケースでは、融雪を合わせた入力量が225mm、総流出高が183mm、ピーク流量が300m³/sであった。よって、前者は入力(降雨+融雪)に対する流出量の比が0.5と、期間中に降ったものが出きらない状態を示すのに対し、後者では0.8と、ほとんどが流出したと見なせる。つまり、4月22日の時点で流域内に潤沢にある積雪が、著しい貯留効果を発揮した一方、積雪のない5月11日の事例では、降雨がそのまま流出する状況にあったと推察できる。

計算結果からは、上記積雪貯留を反映したピーク流量の減衰がうまく再現できていることがわかる。図-9は積雪表面における融雪・降雨量、積雪浸透を経た後の底面流出量、および(流域平均)積雪深の関係を表したものである。結果をみると、積雪の減少にともない、降雨・融雪量ピーク値に対する底面流出量ピーク値が、4月22日の大雨の際に約3割、5月3日で約5割、5月12日で10割と推移している。すなわち、積雪貯留によるピークカットが流出応答の差となって反映されることをモデルは表現している。

とはいえ、ハイドログラフの減衰部については、必ずしも実測値と合致しない場合があることに気づく。これは、水収支があわないため、流出過程での貯留効果を普遍的に再現しきれないことが原因として考えられる。これを改善するには、水収支を満足できるような長い期間で、流出変動を再現しうる方法を選択することである。言い換えれば、貯留効果を長期的スパンで評価することが必要となる。本研究では、そのうちの積雪について評価し、モデル化したものと位置づけられる。

4. おわりに

本報告において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 積雪の貯留効果を簡便な貯留関数で定式化した、このとき用いるモデル定数を積雪深でパラメタライズしたが、実用上十分な精度をもつことを確認した。
- 2) 実流域を対象に、熱収支法に基づいて積雪表面の融雪量を推定し、積雪深に応じた底面流出量を推定した。パラメータで必要な積雪深は長期水・熱収支モデルの推算結果を適用することで、積雪の貯留効果をモデル化できた。
- 3) 融雪期に大雨があるようなシビアなイベントにおい

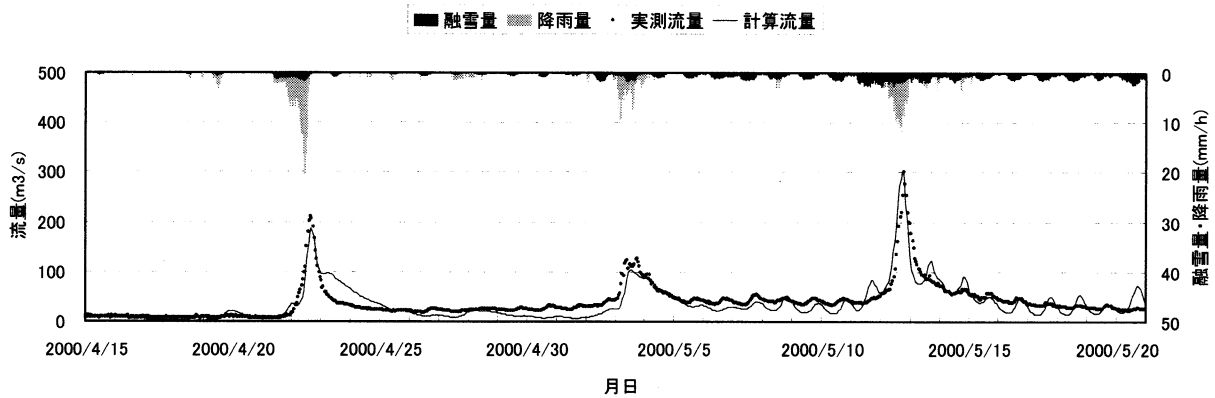


図-8 融雪期における流出量の再現結果（豊平峡ダム流域, 2000, 4/15 1:00-5/20 24:00）

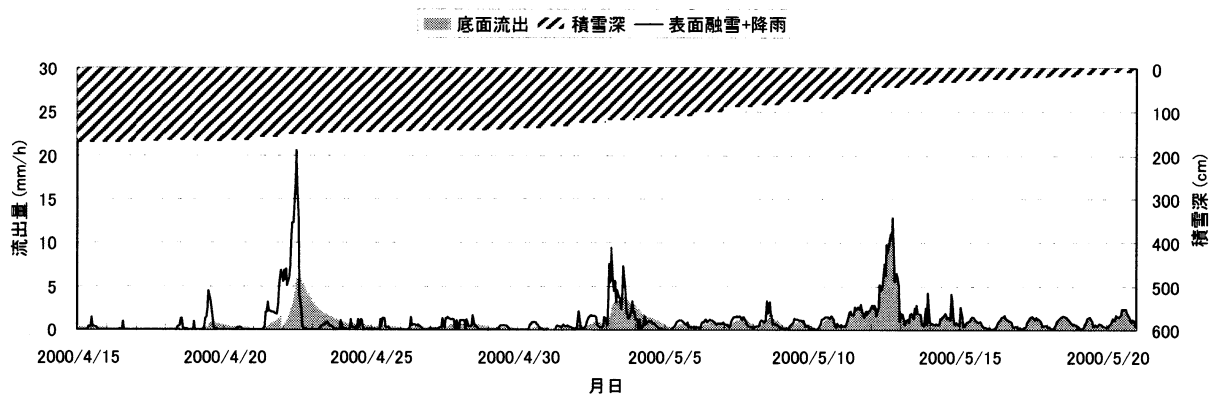


図-9 積雪表面の融雪量・降雨量と積雪底面流出量（豊平峡ダム流域, 2000, 4/15 1:00-5/20 24:00）

でも、積雪貯留効果をモデル上考慮することで、ハイドログラフのピーク値をよく再現できた。

本手法は、アメダスやダム管理所などでルーチン的に計測されているデータで、一連の計算が可能である。今後、他の流域でも積雪や土壌の貯留効果を評価できれば、水資源管理や洪水予測といった実務面での展開が期待できる。

謝辞：本研究は平成15年度日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(C), 課題番号14595006）ならびに平成15年度北海道開発局受託研究費の補助を受けている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 石井吉之: 融雪水の積雪内浸透に及ぼす雪質の効果, 北海道大学地球物理学研究報告, **65**, pp.53-68, March 2002.
- 2) Colbeck, S. C.: The physical aspects of water flow through snow, *Advances in Hydrosience*, **11**, pp.165-206, 1978.
- 3) 山崎剛, 櫻岡崇, 中村亘, 近藤純正, 積雪の変成過程について, I モデル: 雪水, **53**(2), pp.115-123, 1991.
- 4) Marsh, P. and Woo M. K.: Meltwater movement in natural heterogeneous snow covers, *Water Resour. Res.*, **21**, pp.1710-1716, 1985.
- 5) 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, 河川技術論文集, **7**, pp.453-458, 2001.

- 6) Kondo, J. and T. Yamazaki: A prediction model for snowmelt, snow surface temperature and freezing depth using a heat balance method, *J. Appl. Meteor.*, **29**, pp.375-284, 1990
- 7) 日野幹雄, 長谷部正彦: 水文流出解析, 森北出版, 1985.
- 8) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 9) 中津川誠, 濱原能成, 星清: 積雪変化を考慮した長期流出計算, 水工学論文集, **47**, pp.157-162, 2003.
- 10) 園山裕士, 星清, 橋本識秀: 実用的2段タンク型貯留関数法の提案, 土木学会北海道支部論文報告集, **58**, pp.336-339, 2002.
- 11) 中津川誠, 星清: 熱収支を考慮した流域スケールの時間融雪量の推定, 開発土木研究所月報, **506**, pp.2-9, 1995.
- 12) 石井孝, 梨本真, 下垣久: 衛星データによる葉面積指数LAIの推定, 水文・水資源学会誌, Vol.5, No.2, pp.29-36.
- 13) 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**, pp.71-77, 1994.
- 14) 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, No.691/II-57, pp.25-41, 2001.11.
- 15) 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, **42**, pp.121-126, 1998.

(2003.9.30受付)