

融雪期に豪雨が相俟って生起する出水の予測について

ESTIMATION OF FLOOD RUNOFF INDUCED BY HEAVY RAINFALL IN SNOWMELT SEASON

中津川 誠¹・星 清²

Makoto NAKATSUGAWA and Kiyoshi HOSHI

¹正会員 博士(工学) 北海道開発土木研究所環境水工部環境研究室(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²フェロー会員 工博 (財)北海道河川防災研究センター(〒060-0061 札幌市中央区南1条西1丁目 第2有楽ビル)

High water levels of dam reservoirs in cold snowy regions need to be maintained in the spring season because of water uses such as irrigation. Therefore, heavy rainfall coupled with snowmelt renders the flood regulation of dam reservoirs ineffective. There is a possibility of heavy rain even in an early spring resulting from global warming in recent years. Actually, heavy rainfall induced the unexpected flood in the Hoheikyo dam catchment area in Hokkaido in mid-May 2000 and it has caused difficulties in dam management especially from the viewpoint of flood control. This study deals with the estimation of flood runoff due to heavy rainfall coupled with snowmelt. We applied a heat balance model using meteorological data collected for dam operations to calculate snowmelt amounts, while a modified tank model based on storage routing to estimate infiltration of snowmelt and rainfall in snow pack and runoff amount into dam reservoirs. Then, the parameters related to storage routing modeling could be effectively calibrated by runoff separation as well as inverse estimation of water on the ground surface provided as an input of runoff using the filter separation AR method. Thus, the long-term runoff pattern throughout snowmelt seasons was successfully reproduced. The proposed method is of practical use in estimations of snow equivalent to water and inflow and, therefore is applicable to comprehensive water management in a basin of snowy cold regions.

Key Words: Heavy rainfall coupled with snowmelt, estimation of flood runoff, storage routing for infiltration and runoff, calibration of parameter based on runoff separation and inverse estimation of water on the ground surface

1. はじめに

春先の融雪水をいかに貯留し、利用するかは積雪寒冷地の水資源管理上重要なテーマである。したがって、この地域の利水を目的としたダムではなるべくかんがい等の需要に備えて融雪期に貯水位をできる限り上昇させておく必要がある。しかるに近年の地球温暖化で懸念される暖冬傾向によって、融雪期の早まりや、積雪期や融雪期に集中豪雨があるような場合も考えられ、とくに貯水位の高い状況での集中的な流入は流域やダムの安全にとって大きな脅威をもたらす。現に平成12年5月には、北海道の豊平峡ダムで予想外の豪雨に見舞われ、洪水調節量以上の放流(いわゆる但し書き操作)をおこなうような危機管理を要する事態となった。

本研究では上記事例に鑑み、元来融雪に伴って流出量の多い時期に豪雨に見舞われた場合の流出量を的確に推定できる手法を検討した。この中では、繰り返し生起する融雪量をダム管理用気象データの利用によって熱収支

的に推定し、それに降雨量を加えて入力値とし、かつ、積雪の貯留効果を見込んで出力値である流出量を推定することを試みる。この場合、数ヶ月にわたり連続して生起する様々な規模の出水を一連で再現できることを要件とした。そこで、流出成分を分離・再現することによって貯留効果を考慮し、かつ、中長期的な水収支を明確化できるようなタンク型のモデルを提案した。これによって、数ヶ月にわたる融雪期を通して汎用的に適用でき、かつ、現業レベルで容易に運用できる流出予測モデルのあり方を示すことができた。

2. 生起した事例とその要因

今回検討対象とした事例は、図-1に示す位置にある北海道札幌市南部の豊平峡ダムで発生した出水である。豊平峡ダムは治水および発電・水道への利水を目的とした多目的ダムで、流域面積 134km²を有する。当該個所で

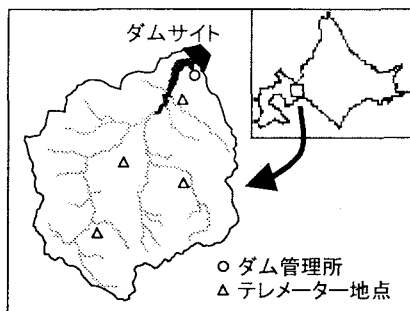


図-1 豊平峡ダム流域(134km²)の位置図

は2000年(平成12年)の冬期間には例年どおりの積雪があり、4月からは暖気にともなう融雪とともに数回の豪雨に見舞われた。これを具体的な数値でみると、2000年4月当初の段階で流域には約700mmの包蔵水量を有していた。また、4月には168mm(4/21 1:00から4/24 0:00までの流域平均3日雨量)、5月には102mm(5/11 1:00から5/14 0:00までの流域平均3日雨量)の降雨があった。

一方、積雪寒冷地にある利水機能を有した多目的ダムでは春期に重要な水資源である融雪水を貯留し、灌漑等の利水に供するというのが一般的である。とくに豊平峡ダムでは融雪期には洪水調節容量をもたず、常時満水位がダム天端高に近いレベルに設定されている。すなわち、この時期はダムの容量を目一杯利水に振り向けるための運用を強いられており、裏を返せば、洪水対応上の観点からは大きなリスクを背負い込んでいることになる。

以上のことが相俟って5月12日からの集中豪雨の際には、図-2に示すように流入量が増加するとともに、貯水位も常時満水位を超える勢いで上昇した。そこで、このようなリスクを回避するため、洪水調節を考慮せずにゲート放流する操作モードに入った。これはダムそのものの安全を守るため、操作規則にある但し書きに沿って講じられる非常的な措置である。以上のような事態に至った要因はいくつか考えられるが、もし、融雪期における降雨と流出の関係が的確に把握できていれば、事前の予備放流等でリスクを軽減できた可能性もある。この観点で考慮すべき課題を整理すると以下の通りである。

- (1) 流域全体の降雨量の的確な把握および予測
- (2) 出水をもたらす融雪量の推定
- (3) 積雪の貯留効果を見込んだ流出量の推定

(1)の問題は、流域内の降雨量が空間的に大きく違うことに起因する。山岳流域では高々100km²程度の範囲でも降雨量が数倍異なる場合があり、1地点だけのデータで降雨量を判断することは危険である。ただし、積雪寒冷地の山岳流域でダムサイトや一般道路沿いに設置されている以外のテレメータは、冬期間および融雪期間中の保守点検が困難である。今回扱う事例では、結果的には降雨観測用テレメータはうまく機能していたが、上記のような懸念等からダムサイトの雨量データのみで降雨や流出の予測を行ってしまった。このことから、信頼性のあ

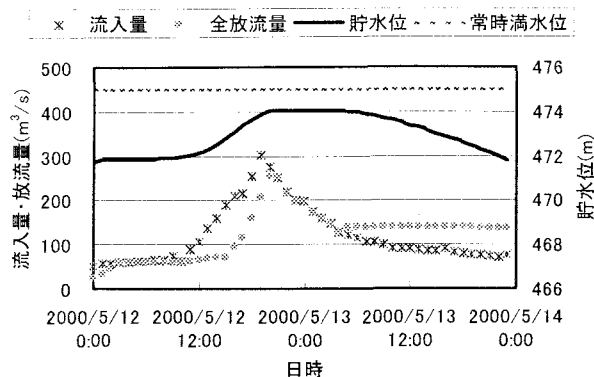


図-2 豊平峡ダムにおける出水時の貯水位および流入量、放流量 (2000/5/12 1:00~2000/5/13 24:00)

る雨量情報を入手するにはテレメータ自体の観測方法や維持管理のあり方を見直すとともに、レーダ雨量の活用やメソスケール気象予測の精度向上などについても検討していく必要がある。

本報告では、とくに上記の(2)と(3)の課題について改善策を提案する。ところで、先に述べたように、4月下旬にも5月中旬出水時の約1.7倍もの総雨量による出水があった。ただし、この際のピーク流入量は5月の事例が300m³/sであったのに対し、4月の事例では210m³/sと、流量では逆に0.7倍にしか過ぎなかった。この状況を説明するには、降雨+融雪を入力、流出を出力とする過程において、とくに積雪状態の変化に起因する貯留効果を評価することが不可欠と考える。また、それによって長期にわたって続く融雪出水を統一的かつ精度良く再現できることが実務的には求められる。

3. モデルの概要

3.1. 全体構成

積雪の貯留効果を評価し、融雪期間を通して適用できる流出モデルのイメージ図を図-3に示す。モデルは以下のサブシステムから構成される。

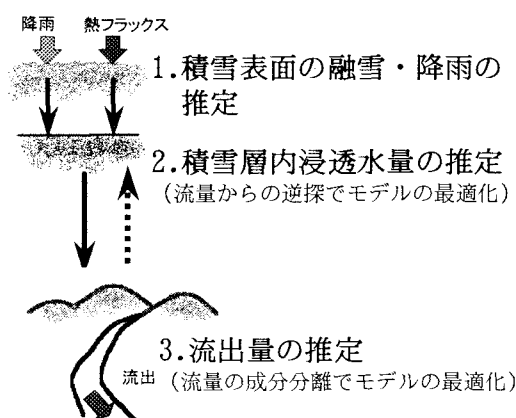


図-3 モデルの全体的なイメージ図

- (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

以上により、入力値として気象・水文データを与えた場合に出力値である流出量が算出できる。なお、この際に与えるデータは、あくまでもダム管理所等で現業的に取得されているものを基本とする。

これらに加え、実務型モデルとして再現性の向上を図るため、各モデルパラメータのチューニングをどのようにおこなうかが要件となる。そこで、(2)の積雪浸透モデルを成分分離 AR 法で逆探される（積雪層の浸透を経た後の）地表面水供給量で最適化することを考える。また、同様に成分分離される流出量で(3)の流出モデルを最適化することを考える。モデルの詳細は以下に示す。

3.2. 積雪表面融雪モデル

積雪表面の融雪量は Kondo ら^{1), 2)}によって提案されたモデルから推算した。また、流域融雪量の推定にこの手法を適用した事例が中津川³⁾によって報告されているので、以下ではそれを参考にする。モデルで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。

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

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

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

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 $T_s(^{\circ}C)$ から $T_{sn}(^{\circ}C)$ 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(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 $^{\circ}C$ 、 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 は大気から積雪表面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、 σ は Stefan-Boltzmann 定数(W/m²/K⁴)、 T は気温($^{\circ}C$)、 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。

また、上式中で必要な各諸量については、観測結果等に基づき次のようにパラメタライズする。

$$\begin{cases} \rho_s = 29 \left(\sum T \right)^{0.5} + 358 & \text{at } \rho_s \leq 500 \\ \rho_s = 500 & \text{at } \rho_s > 500 \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha = -0.020T + 0.554 \quad (5)$$

$$L \downarrow = \sigma T^4 \left[1 - \left(1 - \frac{L_f \downarrow}{\sigma T^4} \right) C \right] \quad (6)$$

$$L_f \downarrow = (0.74 + 0.19\chi + 0.07\chi^2) \sigma T^4$$

ここで ΔT は積算暖度 (デGREE-デイ、 $^{\circ}C$)、 C は雲の効果であらわす係数で $C=0.21h^{1.69}$ (ただし $0 \leq C \leq 1$)、 h は相対湿度、 χ は $\log_{10} u_T^*$ 、 u_T^* は大気柱の全有効水蒸気量(cm) で $u_T^* = 0.14e_a$ 、 e_a は水蒸気圧(hPa)である。

以上によって求められた融雪エネルギー M_0 を融解潜熱 l_f で除すことによって融雪量 m が求められる。一連の融雪計算に必要なデータは気温、湿度、風速、湿度で、ダム管理所で毎時実施されている気象観測値から与えることができる。なお、気温についてはダム管理所データを湿潤断熱減率に基づく標高補正によって用いる。また、融雪量を積雪量から差し引くことで残雪量を逐次求めることができる。このほか、降雨量 r は観測データから与えるが、0 $^{\circ}C$ より小さい場合は降雪とみなし、積雪水量に加算する。また、蒸発散量 e は Hamon 法により気温データから推定して与える。結局、積雪表面における正味の水供給量 $m+r-e$ および積雪水量を 1km $\times$ 1km のメッシュデータとして整理する。

3.3. 積雪浸透モデル

積雪浸透を経て河川に流出するまでの過程をあらわすモデルの模式図を図-4 に示す。積雪浸透にともなう流出遅れを次のような線形貯留関数であらわす。

$$\frac{dS_0}{dt} = m + r - e - q_0 \quad (7)$$

$$S_0 = k_0 q_0 \quad (8)$$

ここで、 S_0 は積雪貯留量(mm)、 q_0 は積雪浸透を経た後の地表面水供給量(mm/h)をあらわす。また、貯留関数のパラメータ k_0 は、前節で得られた積雪表面の水量($m+r-e$) と成分分離 AR 法⁴⁾によって流量から逆探される地表面水供給量から求められる。この際、Newton-Raphson 法によって k_0 の最適値が同定できる。

3.4. 流出モデル

流出モデルには図-4 に示す 2 段タンク型貯留関数⁵⁾を適用する。この際、出水時の表面流出は損失項を含む非線形貯留関数によって、地下水・中間流出は線形貯留関数によって次のように定式化する。

(表面流出)

$$\frac{dS_1}{dt} = q_0 - q_1 - f_1 \quad (9)$$

$$S_1 = k_{11} q_1^{p_1} + k_{12} \frac{dq_1^{p_2}}{dt} \quad (10)$$

$$f_1 = k_{13} q_1, \quad p_1 = 0.6, \quad p_2 = 0.4648 \quad (11)$$

(地下水・中間流出)

$$\frac{dS_2}{dt} = f_1 - q_2 - f_2 \quad (12)$$

$$S_2 = k_{21}q_2 + k_{22} \frac{dq_2}{dt} + S_{02} \quad (13)$$

$$f_2 = k_{23}q_2, S_{02} = S_b \exp(-\lambda t) \quad (14)$$

ここで、 q_1 、 q_2 は各々表面流出量(mm/h)および地下水・中間流出量(mm/h)、 f_1 、 f_2 は浸透量(mm/h)、 k_{11} 、 k_{12} 、 k_{13} 、 k_{21} 、 k_{22} 、 k_{23} はモデルパラメータをあらわす。また、 S_{02} は、入力量である降雨や融雪が0でも流出に寄与する貯留量が必要として導入したもの⁵⁾で、基底貯留量と呼称する。 S_b および λ はそれに関わるパラメータである。

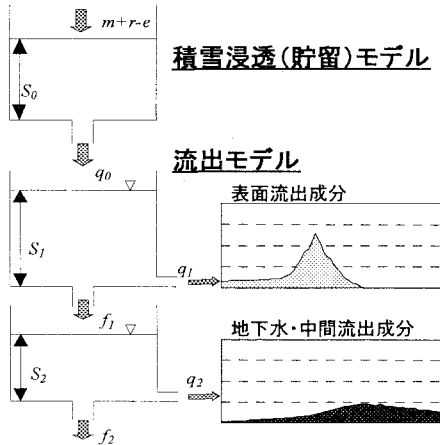


図-4 積雪浸透モデルと流出モデルの模式図

流出モデルのパラメータは、Newton-Raphson 法による探索によって求めることができる。このとき、流出成分は数値フィルターを用いて表面流出成分と地下水・中間流出成分に分離しておく。最初に分離された表面流出成分を用いて $k_{11} \sim k_{13}$ の探索をおこなう。次にここで算出された浸透量 f_1 を入力値、成分分離された地下水・中間流出成分を出力値として $k_{21} \sim k_{23}$ の同定をおこなう。

なお、成分分離をせずに上記全てのパラメータを探索することも理論上は可能であるが、収束性の向上や流出過程の明確化のため、分離された成分毎にパラメータ同定をおこなう方が有利と考えた⁶⁾。また、長期的な流出の再現では、降雨がなくても流出があることなどを貯留分の増減として考慮する必要があるが、今回示したモデルではそれを厳密に表現できないという問題がある。そこで、貯留分からの補給量を S_{02} という強制入力項で表現したが、長期流出の再現においては、この部分のモデル化が今後の課題と言える。

3.5. 流出成分の分離と入力値の逆探の手法

先述したように、流量の成分分離や地表面水供給量の逆探で積雪浸透モデルや流出モデルをチューニングすることを考える。流出成分は数値フィルターによってつぎのように分離できる。

$$\begin{cases} q_{1sep}(t) = q(t) - q_{2sep}(t) & (q_{1sep}(t) \geq 0) \\ q_{2sep}(t) = \alpha \sum w(\tau) q(t - \tau) \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 α は $q_{1sep}(t)$ を負にしないための重み係数、 $w(\tau)$ は $\tau \geq 0$ で次に示すとおりである。

$$w(\tau) = c_0 \exp(-c_1 \tau / 2) \sinh\left(\sqrt{c_1^2 / 4 - c_0} \tau\right) / \sqrt{c_1^2 / 4 - c_0} \quad (16)$$

$$c_0 = (\delta / T_c)^2, c_1 = \delta^2 / T_c \quad (17)$$

ここで、 δ は減衰係数、 T_c は分離時定数(hr)である。 δ は非振動条件を勘案して2.1とした。また、 T_c はハイドログラフ減衰部の解析等から求める。このような分離によって得られた表面流出成分 q_{1sep} および地下水・中間流出成分 q_{2sep} によって3.4節に示した流出モデルのパラメータを成分毎に同定する。

さらに、成分分離に基づき地表面水供給量は次式のように流量から逆推定できる。

$$q_{0inv}(t-1) = \frac{1}{b_i} [q_i(t) - a_{i1}q_i(t-1) - \dots - a_{ip}q_i(t-p)] \quad (18)$$

$$b_i = 1 - a_{i1} - \dots - a_{ip} \quad (19)$$

ここで、 i は1が表面流出成分、2が地下水・中間流出成分を表す添え字、 a は自己回帰 (AR) 係数、 p はAR式の次数をあらわす。AR係数はBurg法などから求めることができる。よって、 i 成分毎に推定される q_{0inv} の合計を地表面水供給量 q_{0inv} とし、これを用いて3.3節に示した積雪浸透モデルのパラメータを同定する。

以上による融雪期の流出量を推算するための具体的手順を図-5のフローチャートで総括する。

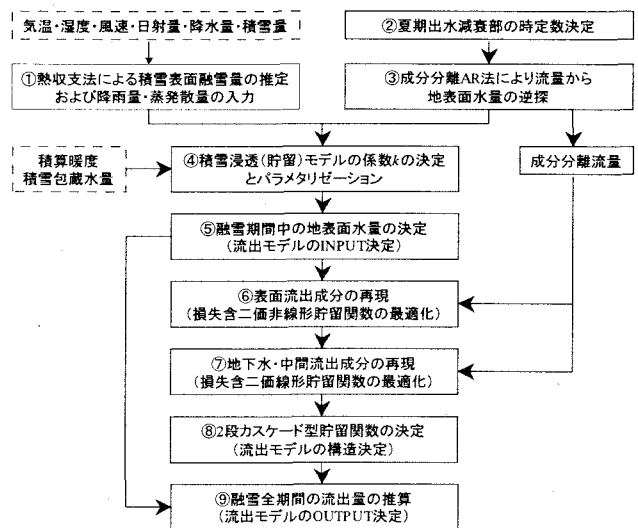


図-5 融雪流出量推定のためのフローチャート

4. モデルパラメータの同定結果

4.1. 積雪浸透モデルのパラメータの同定結果

先に示した手法により、地表面水供給量 q_{0inv} を逆探し、これを用いて式(7)および(8)のパラメータ k_0 を同定する。

地表面水供給量の逆探には成分分離 AR 法を適用するが、まずは数値フィルターによって流出量を分離する。この際、表面流出成分と地下水・中間流出成分を分離する時定数 T_c (式(17)参照) を決定する必要がある。これは出水時ハイドログラフの低減部から推定することができる。なお、融雪期は1日ごとに流出の増減を繰り返すことから低減部の抽出が難しいと考え、既往の夏期出水の低減部を解析した。結果として、豊平峡ダム流域では $T_c=34\text{hr}$ という値を得た。

次に各成分に AR 法を適用し、式(18)および(19)にあるように自己回帰式の雑音成分として地表面水供給量 q_{0inv} が算出できる。2000 年のいくつかの融雪出水を解析し、表面流出を 2 次の AR 式 ($a_{11}=1.1887, a_{12}=-0.7037$)、地下水・中間流出を 2 次の AR 式 ($a_{21}=1.0099, a_{22}=-0.0727$) で表現し、それから q_{0inv} を求めた。

最後に q_{0inv} を用い、積雪浸透モデルのパラメータ k_0 を Newton-Raphson 法により同定する。この際、 k_0 で表現される貯留時定数は積雪の状態に左右されると考え、その時点の積算暖度 $\Sigma T(^{\circ}\text{C})$ および包蔵水量 $S_d(\text{mm})$ と関連づけ、回帰分析によって次のようにパラメタライズした。

$$k_0 = -0.077 \sum T + 0.021 S_d + 13.793 \quad (20)$$

なお、積算暖度は 4 月 1 日から累積した値とし、 k_0 が負になる場合は $k_0=0$ とする。

式(7)、(8)および(20)によって 2000 年 4 月 1 日 1 時から 5 月 20 日 24 時にかけて地表面水供給量を推算した結果を図-6 に示す。また、図-7 には 3 月に実施されたスノーサーベイの結果を初期値として、逐次計算される融雪量を差し引いて流域に残存する積雪水量を求めた結果を示す。図からわかるように、4 月 22 日には場所によっては 600mm 以上の積雪があるのに対し、5 月 12 日には残雪がほとんどないことがわかる。なお、積雪に関わる計算結果の妥当性は、図-8 に示す積雪深の観測値と計算値との比較から確認されている。

これらから積雪状態の違いが貯留効果に差違を生み出し、4 月下旬には積雪面に降る集中豪雨が浸透の過程で平滑化される一方、5 月中旬にはその効果がきわめて小さいことが表現されている。さらに言うと、このことは積雪の状態を定量化できる手法を導入しなければ、融雪期に動的に変化する貯留効果の評価が難しいことを示している。また、本手法は状態変数として流出量を算出できるほか、融雪に応じて残存する積雪水量も逐次推算できるため、水資源管理上も有用と考える。

4.2. 流出モデルのパラメータの同定結果

3.4 に示す流出成分毎のパラメータ同定のため、再現の目標となる流出量を成分分離する。これについては先の 4.1 節に示した結果と同じである。

ところで、式(14)に示す地下水・中間流出の基底貯留量を定式化しておく必要がある。そこで、2000 年の 4 月

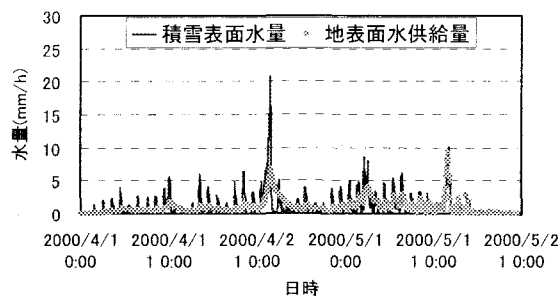


図-6 積雪浸透前後での水量の変化(4/1~5/20, 50days)

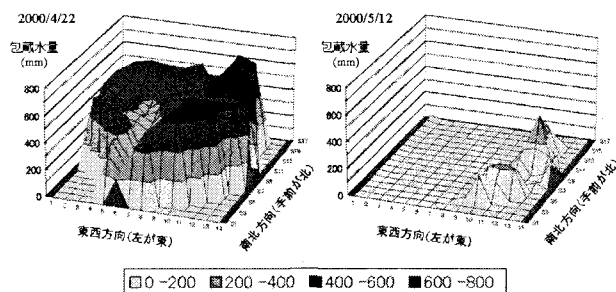


図-7 流域内の残存積雪水量の変化 (単位は mm)

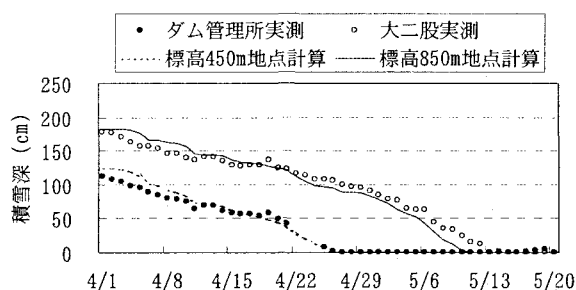


図-8 積雪深の再現結果 (4/1~5/20, 50days)

から 5 月にかけての(融雪 m +降雨 r -蒸発散量 e)と(流出量 q)のマスカブを描き、その差分を貯留量 S と考えると、 S は 5 月初旬までは貯留量が単調増加、その後 1 週間ほどは頭打ちとなって徐々に低減していく傾向がみられた。これを長期的な時間スパンの貯留(基底貯留)と考え、とくに低減部に着目して、次のように定式化した。

$$S_{02} = 383 \exp(-0.004t) \quad \text{at} \quad \sum (m+r-e) > 970 \quad (21)$$

ここで、 t は上式の適用条件 $\sum (m+r-e) > 970\text{mm}$ となった時点からの経過時間(hr)をあらわす。なお、上式の係数や適用条件は基底貯留量が減少に転じたときの分析から求めた。結局、基底貯留の低減部は、それまでの貯留分から補給を受ける期間とみなすことができる。

以上により、3.4 に記した手法でパラメータを逐次同定し、表面流出、地下水・中間流出を再現した結果を図-9 に示す。ここで得られたパラメータ値は $k_{11}=9.20$ 、 $k_{12}=11.78$ 、 $k_{13}=0.28$ 、 $k_{21}=20.42$ 、 $k_{22}=263.69$ であった。なお、地下水・中間流出成分に関わる損失項のパラメータ k_{23} は 0 とし、上記 2 成分で水収支が満足できるとした。

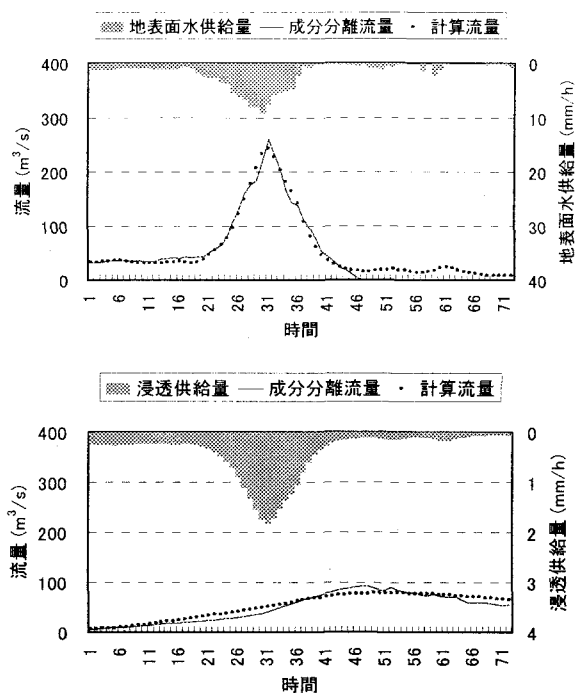


図-9 各成分別の再現結果 (上: 表面, 下: 地下水・中間)
(5/11 13:00~5/14 12:00)

5. 流出量の再現結果

最後に同定されたパラメータを用い、融雪期間を通して流出量の推算をおこなう。結果は図-10 に示す。この期間中 (4月1日 1:00 から5月20日 24:00 の50日間もしくは1,200時間) に3回の主要な出水があったが、一連の計算のなかでピーク値はほぼ再現されている。再現性が一般化できた理由は、積雪の貯留効果を考慮し、地

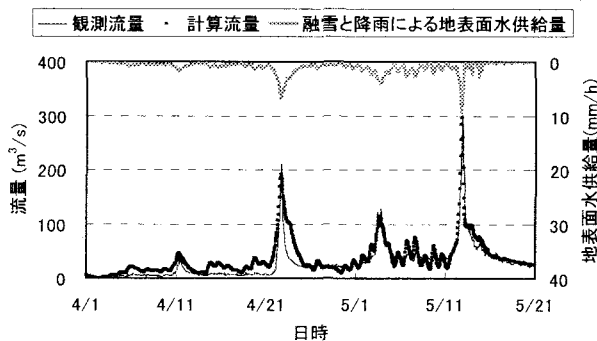


図-10 融雪期間の流出量の再現結果 (4/1~5/20, 50days)

表-1 融雪期間中の水収支 (4/1~5/20, 50days)

融雪量(m) (mm)	降雨量(r) (mm)	蒸発散量(e) (mm)	水供給量($m+r-e$) (mm)	流出量観測値(q_{obs}) (mm)
758	457	67	1,148	896
表面流出量(q_1) (mm)	地下水・中間流出量(q_2) (mm)	表面浸透量(f_1) (mm)	地下浸透量(f_2) (mm)	流出量計算値(q_{cal}) (mm)
824	271	244	0	1,095

表面水供給量が平滑化できたことが大きいと考える。融雪量や降雨量の流出モデルへの直接入力だけでは、4月下旬の出水を過大に、あるいは5月中旬の出水を過小に (危険側に) 評価する可能性が大きい。

なお、上記全期間中の水収支は表-1 に示すとおりである。結果的には入力 (=融雪+降雨-蒸発散) より出力 (=流出) が少ない。現状の手法では流出量は入力値にバランスするように算出されるので、総量的には上記に相当する誤差が生ずることになる。その解消には先述したような長期的な貯留効果を考慮することが必要であり、長期水収支と出水時ピークの再現を同時に評価できるような手法の検討が今後の課題と言える。

6. おわりに

積雪寒冷地のダムで発生した出水を例に、融雪期に集中豪雨がある場合の流出再現手法を提案した。結論をまとめると以下のとおりである。

- (1) 時期的に変化する積雪の貯留効果を評価した。
- (2) 積雪浸透モデルを流量の逆探で得られる地表面水供給量からチューニングした。
- (3) 流量の成分分離に基づき、多くのパラメータを有する流出モデルを効果的にチューニングした。
- (4) 以上によって融雪期をとおした出水を連続的に再現できた。
- (5) 流域の残雪量の変化を再現できた。

上記手法を一般化し、近年進歩の著しい気象予測情報と組み合わせることで出水予測や水資源予測が可能となるであろう。積雪寒冷地流域では利水機能のウエイトの大きい融雪期に、水資源管理と洪水対応を効果的にこなうことが必要である。今回の手法を発展させることで、このような流域水管理の問題に対し、実務的に活用できるようになると考える。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 3) 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.
- 4) 日野幹雄, 長谷部正彦: 水文流出解析, 森北出版, 1985.
- 5) 嵯峨浩: 北海道におけるタンクモデルの総合化, (財) 北海道河川防災研究センター研究所紀要, pp.59-69, 1998.
- 6) 中津川誠, 星清: 流出成分の分離によるタンクモデル定数の最適化, *水文・水資源学会 1996 年研究発表会要旨集*, pp.32-33, 1996.

(2001. 4. 16 受付)