

# 積雪変化を考慮した長期流出計算

## Long-term Runoff Calculation Considering Change of Snow Pack Condition

中津川 誠<sup>1</sup>・濱原 能成<sup>2</sup>・星 清<sup>3</sup>

Makoto NAKATSUGAWA, Yoshinari HAMAHARA and Kiyoshi HOSHI

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>正会員 株式会社 福田水文センター (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目2-4)

<sup>3</sup>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)

In order to conduct adaptive water management for an entire watershed, long-term hydrologic conditions must be clarified. In particular, the hydrologic process related to snow plays an important role in cold, snowy regions such as Hokkaido. Therefore, reliability of estimations of snow accumulation and snowmelt are needed to perform effective water management, while evapotranspiration relating to the conditions of soil and vegetation is also needed to clarify the water budget in an entire watershed.

This paper focuses on the hydrologic process reproduced by the Two-layer model that deals with the heat balance in the atmosphere, the vegetation layer and the ground surface, as well as the long-term runoff characteristics calculated by the Tank model. In the model, the hydrologic process was evaluated in relation to the conditions of snow pack and snowmelt. Specifically, the parameters of the Tank model were effectively fine-tuned by applying the Filter-separation AR method and the Newton-Raphson method. Thus, the proposed model gives a promise to reasonably estimate the hydrologic process in cold, snowy region.

**Key Words :** Two-layer model, tank model, snow pack condition, long-term runoff calculation, Newton-Raphson method

### 1. はじめに

健全な水循環系を企図した水管理のため, 長期的な水文諸量の把握が必要とされる. また, 洪水時の流出パターンは流域の貯留状態に大きく依存するため, それを評価するには流域の水収支を明らかにした長期流出モデルの構築が不可欠である.

とくに積雪寒冷地の長期流出モデルには, 雪に関わる水文諸量の定量化が不可欠である. これまで融雪を考慮した流出モデルが数多く提案されてきた. 積雪や融雪については, 近藤ら<sup>1)</sup>, 山崎ら<sup>2)</sup>が提案しているようなモデルがあり, 融雪を含む流域の水収支を包括的に評価した例には, Bathurstら<sup>3)</sup>の研究もある. しかしながら, 積雪・融雪を流域レベルで水収支上妥当に推算するのは, 以下の理由から困難をともなうと考えられる.

- 1) 流域全体で降雪量を把握することが難しいこと.
- 2) 積雪深とあわせて積雪水量の把握, すなわち積雪密度の評価が難しいこと.
- 3) 融雪水の浸透, 言い換えれば積雪の貯留効果は積雪の状態変化に依存し, しかも刻々と変化すること.
- 4) 積雪の有無がわからないと地表面の状態(地温やアルベドなど)を正しく評価できず, 水収支上不可欠な蒸発散量を的確に推算できないこと.

以上を集約すると, 大気・地表面間の熱交換に影響を

与え, 流出時に貯留効果を発揮する積雪の有無や状態変化を妥当に評価しなければ, 流域全体の水収支や流出を的確に再現するのは難しいということになる.

そこで本研究においては, 以下の方針によって水収支上妥当な水文諸量の推算を図った.

- 1) 降雨と降雪は観測値を標高等によって補正し, 流域全体で妥当な値となるようにした.
- 2) 近藤ら<sup>1)</sup>の提案している2層モデルを適用して大気・地表面間の熱交換を計算し, それに応じた融雪量, 蒸発散量を推算した.
- 3) 積雪水量を降雪と融雪(+蒸発散量)の収支に基づいて求め, 同時に積雪深および積雪密度を推算した.

これらによって, 実際のダム流域を対象に, 数力年にわたる水文諸量を算出した. また, それらの妥当性は, 例えば降水量とダムへの流入量の差し引きを蒸発散量とみなしてどうか?, あるいは実測されている積雪深や積雪水量を再現しているか?, などから総合的に判定した.

次にこのようにして求めた降雨量, 融雪量および蒸発散量を入力量として流出計算をおこなう. このとき, 長期流出の再現性を勘案し, 表面流出, 中間流出, 地下水流出の成分毎に貯留量と流出量をうまく推算できるタンクモデルを適用する. しかし, この場合多くのモデルパラメータの探索を強いられることになる.

タンクモデルのパラメータ探索法として, 最近では遺

伝的アルゴリズム (GA)<sup>4)</sup>などが提案されているが、本研究では収束性に優れるNewton-Raphson法を適用した。ただし、探索法の適用に先立ち、成分分離AR法<sup>5)</sup>に基づいて地下水流出に関わるパラメータを決定し、探索が効果的にできるように工夫した。

以上により、貯留効果をもたらす雪の消長を評価し、流域の水収支に裏付けられた流出量の算出がなされた。なお、当該モデルはダム管理所等で計測されているルーチンデータを基本としており、実務上も十分に活用できるものである。

## 2. 積雪条件下の水文諸量の推定

今回の解析対象としたのは、図-1に示す位置にある豊平川上流部の定山溪ダム流域 (104km<sup>2</sup>)、豊平峡ダム流域 (134km<sup>2</sup>) および漁川ダム流域 (113km<sup>2</sup>) の3流域である。各ダムは洪水調節 (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あり、国土交通省北海道開発局が管理している。流域は常緑針葉樹林が大半で、落葉樹が少ない積雪寒冷地特有の森林を形成している。

なお、以後の計算では、基本的にダム管理用のルーチンデータ (降水量、風向・風速、日射量、日照時間、湿度、気温、積雪深等) を使用している。

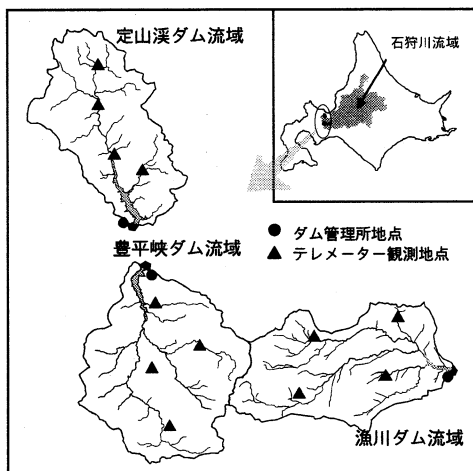


図-1 解析対象箇所

### (1) 降水量の推定

流域内の水収支を明らかにするため、降水量、降雪量といった水文諸量を図-2の手順に従って推算する。本報告では標高による降水量の違いを考慮し、標高とダム管理所における降雨量もしくは降雪量 (降雪深) を式(1)、(2)の回帰式<sup>6)</sup>によって、任意メッシュ (約1km×1km) ごとに推定した。

$$\text{降雨量: } R_i = a_1 X_1 + a_2 X_2 \quad (1)$$

$$\text{降雪量: } S_i = S_1 [b_1 \ln(H_n) + b_2] \quad (2)$$

ここで、 $R_i$ はメッシュ*i*の日降水量(mm/d)、 $X_1$ はメッシュ*i*の標高(m)、 $X_2$ はダム管理所日降水量に重み係数 $\lambda$ を乗じた

値(mm/d)、 $a_1 \sim a_2$ は重回帰係数、 $S_i$ はメッシュ*i*の降雪深(cm/d)、 $S_1$ はダム管理所地点の降雪深(cm/d)、 $H_n$ はメッシュ*i*とダム管理所地点との標高比、 $b_1$ および $b_2$ は回帰係数をあらわす。また、 $\lambda$ は下式のとおりである。

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_i$ は流域テレメータ観測所のティーセン係数 (=支配面積/流域面積)、 $\beta_i$ はダム管理所と観測所の単相関から求めた回帰係数である。

なお、上式で推定した流域平均降雨量はティーセン法で求められた結果とほぼ同様であった。また、ダム管理所地点で降雨が観測された場合、降水量をメッシュごとに降雨か降雪かに判別する必要がある。この際、近藤ら<sup>7)</sup>が提案している雨雪判別温度を適用し、気温が判別温度より大きい場合は降雨とみなし、その逆の場合は降雪量とみなして先述した降雨推定式から降水量を求めた。また、降雪深を降雪量に変換する際に用いる降雪密度は0.16g/cm<sup>3</sup>とした。以上により降雪量も降雨と同様のメッシュデータとして整理される。

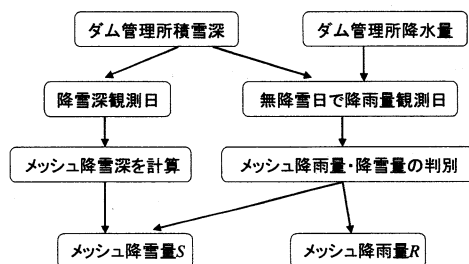


図-2 流域降水量推定のフローチャート

### (2) 蒸発散量の推定

蒸発散量は地被や植被の状態によって動的に変化する。そこで、より高い精度で熱フラックスを推定するために、地表面 (積雪面) と植被層各々の熱収支を近藤ら<sup>1)</sup>によって提案されている2層モデルに基づき、下式のように定式化した。なお、この際の熱収支において、遮断蒸発を考慮<sup>8)</sup>するようにしている。

$$f_v R \downarrow + (1 - f_v) \sigma T_v^4 - Q_G + Q_R = \varepsilon \sigma T_g^4 + H_g + l E_g \quad (4)$$

$$(1 - f_v) (R \downarrow + \varepsilon \sigma T_g^4) = 2(1 - f_v) \sigma T_v^4 + H_v + l (E_v + I) \quad (5)$$

ここで、(4)式は地表面、(5)式は植被層の熱収支式である。また、 $f_v$ は放射に対する植被層の透過率、 $R \downarrow$ は下向きの正味放射量(W/m<sup>2</sup>)、 $Q_G$ は土壌もしくは積雪に供給される熱フラックス(W/m<sup>2</sup>)、 $Q_R$ は降雨によって供給される熱フラックス(W/m<sup>2</sup>)、 $H_g$ および $H_v$ は各々地表面(土壌もしくは積雪面)および植被層からの顕熱フラックス(W/m<sup>2</sup>)、 $l E_g$ および $l E_v$ は各々地表面(土壌もしくは積雪面)および植被層からの潜熱フラックス(W/m<sup>2</sup>)、 $l I$ は植被層からの遮断蒸発に伴う潜熱フラックス(W/m<sup>2</sup>)、 $T_g$ および $T_v$ は各々地表面(土壌もしくは積雪面)および植被層の代表温度(K)、 $\varepsilon$ は射出率(地表面=1.00、積雪面=0.97)、 $\sigma$ はStefan-Boltzmann

定数( $=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ )である。

以上により、各層の代表温度 $T_g$ および $T_v$ を求め、顕熱・潜熱フラックスをバルク法より求める。降水による遮断蒸発潜熱は、近藤ら<sup>1)</sup>の知見に基づき推定し、降雪も降雪と同様に推定する。また、アルベドは気温によってパラメタライズ<sup>6)</sup>し、森林の効果を表す葉面積指数LAIは、石井ら<sup>7)</sup>によるLAI月別値を用いた。このほか、バルク輸送係数、蒸発効率<sup>1)</sup>は文献値<sup>1)</sup>に基づき、水収支法との整合性を考え、土壌面、積雪面、植被層各々の値を設定した。

2層モデル法により求められた蒸発散量を年平均値としてまとめたものを表-1に示す。推定結果からは、遮断蒸発量が全蒸発散量の50%強という支配的要因であることが示された。また、今回推定された蒸発散量は、同じ条件下でThornthwaite式やPenman式を適用して得られた可能蒸発散量とほぼ同様であった。

表-1 2層モデルによる蒸発散量の推定結果  
(豊平峡・定山溪は1996~2000、漁川は1998~2001)

流域	植被層蒸散	遮断蒸発量	地表面蒸発散	2層モデル法
定山溪ダム	152	278	81	511
豊平峡ダム	181	282	110	573
漁川ダム	139	285	90	514

単位: mm/年

### (3) 積雪量・融雪量の推定

積雪は、降雪があった場合に累加される一方、融雪量と地表面蒸発散量を差し引いて求める。融雪量は、先に示した2層モデルにより、以下の手順で求める。

- 1) 式(4)、(5)より得られた $T_g$ を積雪温度(仮値) $T_s$ とする。
- 2)  $T_s \leq 0(^{\circ}\text{C})$ のときは積雪表面融雪が起きないとし、積雪温度 $T_s = T_g$ とする。このとき、各種知見<sup>1), 8)</sup>に基づき、底面融雪量として1mm/dを別途与える。
- 3)  $T_s > 0$ のときは $T_g = T_s = 0(^{\circ}\text{C})$ とする。このときの植被層温度は式(5)で与える。
- 4) 式(4)より積雪供給熱量 $Q_G$ を求め、それに相当する融雪量を算出する。この際、底面融雪量1mm/d (に相当する融解潜熱 $3.86 \text{ W/m}^2$ )を別途与える。

次に積雪に関する諸量を求める。時刻 $t$ の積雪水量は積雪の水収支に基づき、次のように定式化される。

$$S_w(t) = S_w(t-1) - (m(t) + e(t)) + \frac{\rho_{sf}}{\rho_w} S_f(t) \quad (6)$$

また、積雪深、積雪密度は下式から求める。

$$S_d(t) = \left[ S_d(t-1) - (m(t) + e(t)) \frac{\rho_w}{\rho_s(t-1)} + S_f(t) \frac{\rho_{sf}}{\rho_s(t-1)} \right] \eta_s \quad (7)$$

$$\rho_s(t) = \frac{S_w(t)}{S_d(t)} \rho_w \quad (8)$$

ここで、 $S_w$ は積雪水量(mm)、 $S_d$ は積雪深(mm)、 $S_f$ は降雪深(mm)、 $m$ は融雪量(mm)、 $e$ は蒸発散量(mm)、 $\rho_w$ は水の密度( $=1,000 \text{ kg/m}^3$ )、 $\rho_s$ は積雪密度( $\text{kg/m}^3$ )、 $\rho_{sf}$ は降雪密度( $\text{kg/m}^3$ )、 $\eta_s$ は全層沈下率である。

なお、本事例の降雪密度は $160 \text{ kg/m}^3$ とした。また、積雪の圧密については、詳細なモデルを提案した山崎ら<sup>2)</sup>の研究もあるが、本事例では簡便化のため全層沈下率を

導入した。この全層沈下率は積雪密度に関係すると考え、最小積雪密度 $309 \text{ kg/m}^3$ で0.999、最大積雪密度 $700 \text{ kg/m}^3$ で0.985という値を按分し、積雪密度に応じて与えた。

この結果、地表面の積雪の有無が判定でき、その違いに応じて熱フラックスと蒸発散量も計算できることとなり、それが表-1の結果にも反映されている。すなわち、地表面の状態が熱フラックスを支配し、蒸発散や融雪に影響を与える。図-3にはアルベドの実測値とそれを気温によってパラメタライズした結果を示す。また、それに伴って計算された地表面温度、蒸発散、積雪・融雪について、定山溪ダム流域(2000年)の例を図-4に示す。アルベドは積雪の有無で著しく変化するが、それはうまく推定できていると考える。また、融雪期には融雪とともに凝結に対し、大気から地表面に向かう熱輸送があり、水供給がなされていることがわかる。そのような熱収支の特徴を表現し、蒸発散量、積雪・融雪も妥当な傾向で推算していると考えられる。

そこで、とくに積雪の変化について、定山溪ダム流域の観測所(流木処理場)において積雪深、積雪密度を検

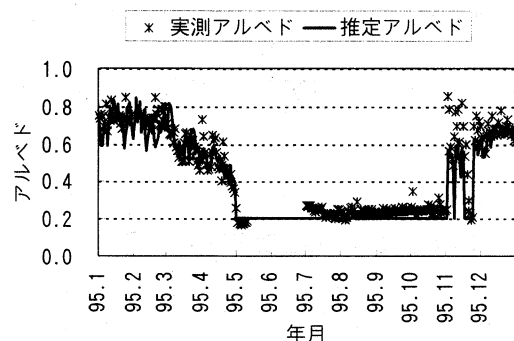


図-3 アルベドの計測と推定結果  
(定山溪ダム流木処理場, 1995.1.1~12.31)

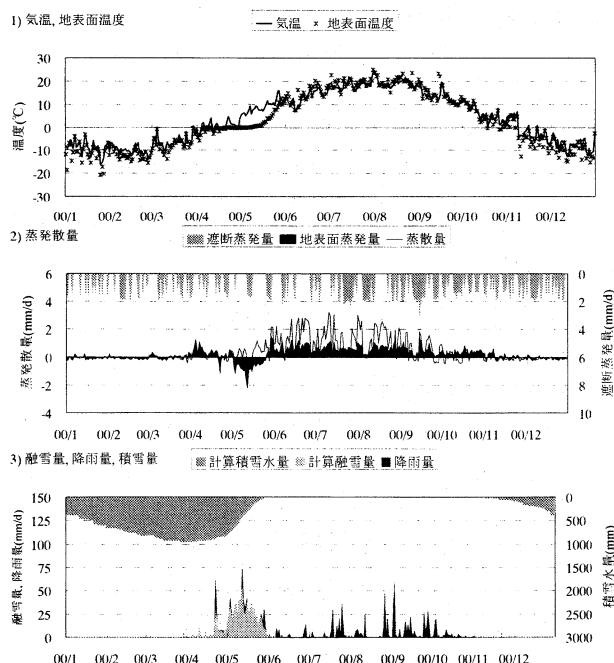


図-4 モデルで推算された温度・蒸発散・積雪変化  
(定山溪ダム流域平均, 2000.1.1~12.31)

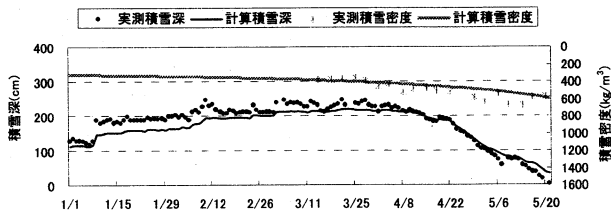
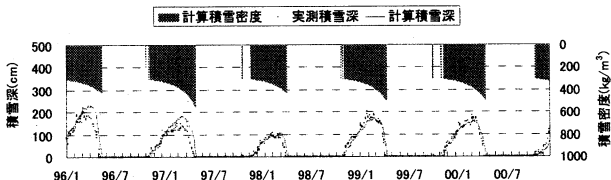
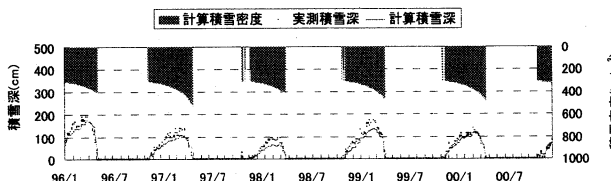


図-5 積雪深と積雪密度の検証結果  
(定山溪ダム流木処理場, 1996.1.1~5.21)

1) 定山溪ダム管理所地点 1996.1.1~2000.12.31



2) 豊平峡ダム管理所地点 1996.1.1~2000.12.31



3) 漁川ダム管理所地点 1998.1.1~2001.12.31

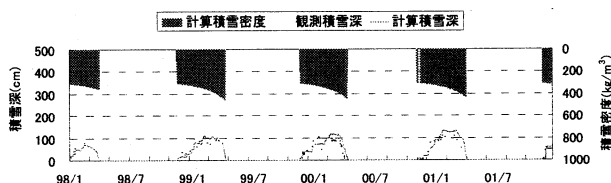


図-6 積雪深と積雪密度の推定結果

証した例を図-5に示す。また、各ダム管理所の積雪深、積雪密度を推定した結果を図-6に示す。他の箇所も含め、消雪のタイミングなどは概ね妥当に推定されている。

#### (4) 流域水収支の評価

(1)で推定した流域降水量と流出量から水収支的に蒸発散量を推算した結果を表-2に示す。北側にある定山溪ダムと南側にある豊平峡ダムでは降雨量と降雪量に違いがみられるものの、蒸発散量は500mm強とほぼ同様であり、2層モデル法でも同様の結果(表-1参照)が推算されている。また、蒸発散量と流出量の割合は1:3ほどで、定山溪を対象に得た他の結果<sup>9)</sup>と類似の傾向を示していた。ただし、漁川ダムでは降水に対する流出が小さい。気候的には蒸発散量が大きく異なると考えづらいので、浸透による流域外への流出が考えられる。なお、漁川ダム流域の地質は透水性の高い軽石系堆積物が卓越している。

なお、全降水量に降雪の占める割合は、日本海側に近い定山溪が約6割、太平洋側に近い豊平峡が約5割、漁川が約4割と推算され、気候的特徴が反映されている。

表-2 流域水収支に関わる諸量  
(豊平峡・定山溪は1996~2000, 漁川は1998~2001)

流域	降雨量	降雪量	流出量	水収支蒸発散量
定山溪ダム	811	1263	1569	505
豊平峡ダム	1043	1077	1604	516
漁川ダム	1293	853	1371	775

単位: mm/年

### 3. 流出量の推定

#### (1) タンクモデルのパラメータ探索手法

流出モデルとしては、貯留効果をうまく表現しながら流出を推算できる図-7の3段タンクモデルを採用した。また、パラメータはNewton-Raphson法に基づく数学的最適化手法<sup>10)</sup>によって同定する。

ここで、数多くのパラメータを一度に探索するのは困難であることが予想される。そこで、探索を効果的におこなう工夫として以下のような方法を考えた。まず、日野ら<sup>5)</sup>の方法にしたがい、流出成分を分離し、各々をAR(自己帰帰)式で表現する。成分としては地下水流出成分 $q_G$ 、中間流出成分 $q_M$ および表面流出成分 $q_S$ の3つで、分離はハイドログラフ低減部の時定数から定式化できる。このなかで地下水流出は次式のように表すことができる。

$$q_G(k) = \sum_{i=1}^p A_{Gi} \cdot q_G(k-i) + B_G \cdot r_G(k-1), \quad B_G = 1 - \sum_{i=1}^p A_{Gi} \quad (9)$$

上式は $p$ 次のAR式で、 $A_{Gi}$ はAR係数、 $r_G$ は地下水流出に相当する降水量である。

次にタンクモデルは次のとおり定式化される。

$$\begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= r_e - q_1 - q_2 - p_1, \quad \frac{dS_2}{dt} = p_1 - q_3 - p_2, \quad \frac{dS_3}{dt} = p_2 - q_4 \\ q_1 &= a_1(S_1 - z_1), \quad q_2 = a_2(S_1 - z_2), \quad q_3 = a_3(S_2 - z_3), \quad q_4 = a_4 S_3 \\ p_1 &= b_1 S_1, \quad p_2 = b_2 S_2 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $q_1 \sim q_4$ は流出量(mm/d)、 $p_1$ および $p_2$ は浸透量(mm/d)、 $r_e$ は有効降水量(降雨量+融雪量-蒸発散量, mm/d)、 $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, z_1, z_2$ および $z_3$ はパラメータで計9個ある。これらより1階線形微分方程式の解として各タンクの貯留量が得られ、さらに流出量が得られる。ところで、この中で $S_3$ に関わる部分だけを考えると、地下水流出量 $q_4$ は次のように表わすことができる。

$$\frac{dq_4}{dt} = -a_4 q_4 + a_4 p_2 \quad (11)$$

$q_4$ は1階線形微分方程式の解として次のような漸化式で表すことができる。

$$q_4(k) = \exp[-a_4 t] \cdot q_4(k-1) + \{1 - \exp[-a_4 t]\} \cdot p_2(k-1) \quad (12)$$

式(9)と式(12)を比較し、入力項( $r_G$ ないし $p_2$ )に掛かる係数が等しいとすると、 $a_4$ は次式で表すことができる。

$$a_4 = -\frac{1}{t} \ln \left[ \sum_{i=1}^p A_{Gi} \right] \quad (13)$$

ここで、 $t$ は計算時間ステップ( $=1$ day)であり、結局地下水流出のパラメータ $a_4$ がAR係数によって決定できること

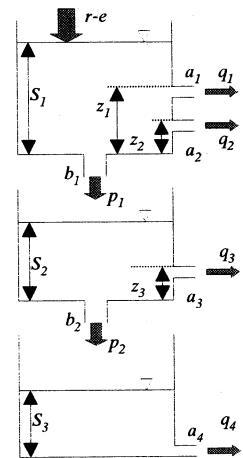


図-7 3段タンクモデル

になる。このようにパラメータ探索において、成分分離AR法を補助的に適用することで、1)成分毎のパラメータ探索が可能となり、2)一部のパラメータが事前に決定される、という利点が生まれる。たとえば、収束計算がうまくいかない場合は、分離流量を用い、成分毎に逐次探索する方法もある。ただし、本事例では先に述べたように $a_4$ を固定し、残る8個のパラメータを一度に探索できた。

パラメータ探索に用いたNewton-Raphson法は、目的関数 $J(\mathbf{P})$ を最小にするように、パラメータの更新量 $\delta \mathbf{P}$ を次式から求めていく。

$$\delta \mathbf{P} = - \left[ \left( \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{P}} \right)^T \left( \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{P}} \right) \right]^{-1} \left[ \left( \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{P}} \right)^T \mathbf{e}(\mathbf{P}) \right], e_j = \frac{[q_j^* - q_j(\mathbf{P})]}{\sqrt{q_j^*}} \quad (14)$$

ここで、 $\mathbf{P}$ は $9 \times 1$ のパラメータベクトル、 $\mathbf{e}$ は $N \times 1$ の誤差ベクトル( $j$ 番目データの誤差は上式の $e_j$ )、 $N$ はデータ数、 $q$ は計算流量、 $q^*$ は観測流量である。なお、パラメータによる誤差の微分値( $N \times 9$ のJacobian行列、 $\partial \mathbf{e} / \partial \mathbf{P}$ )は解析的に得られることから、収束性に優れるという特徴がある。

## (2) 流出解析の結果

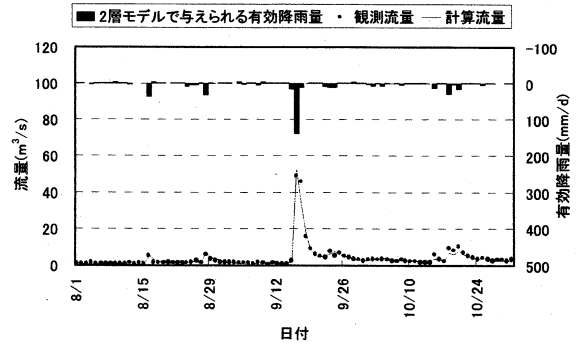
パラメータの探索は、各ダム流域とも1998年8月～10月の3ヶ月間(92日)の降雨期間のみのデータを用いておこない、その結果を数カ年の長期流出計算に適用する。豊平峡ダムを例にパラメータ探索過程を表-3に、各ダムの流出解析の結果を図-8に示す。豊平峡ダムの場合、繰り返し回数12回で収束していることがわかる。また、地下水流出に関する諸元を表-4に示す。先に示したように $a_4$ はAR係数の和から式(13)で決定できる。なお、日平均流量の平均二乗誤差(RMSE、 $= (\sum (q_{cal} - q_{obs})^2 / N)^{0.5}$ )は、定山溪で1.6、豊平峡で1.5、漁川で3.1であった。

## (3) 流出計算の結果と考察

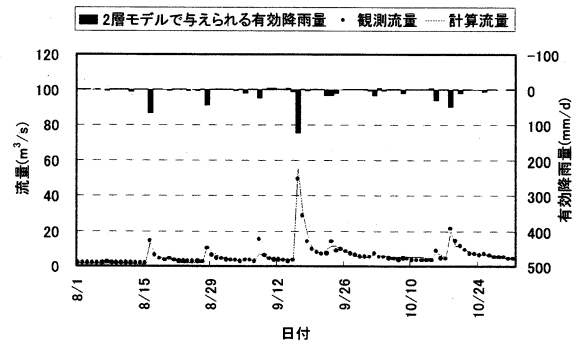
最終的に、蒸発散量を差し引いた正味の降雨量、融雪量を入力値として、(日平均)流出量および貯留量の推算を試みる。結果を図-9に示す。3ヶ月という限定された期間でパラメータを同定しているが、融雪期も含む長期間の流出をうまく再現していることがわかる。ただし、大雨などで急激に流出量が増加した場合は、モデルが十分に応答できていないようにみられる。そのような非線形性の強い流出に対しては、時間解像度の細かい計算が必要と考える。

すなわち、短い時間スケールの洪水流出計算をおこなう場合にも、今回提案した長期流出計算によって貯留や積雪の動向を捉え、初期条件に反映させることが再現性向上に有効と考える。図-10には各タンクの貯留量を示した。これから豊平峡や漁川の場合、地下水貯留が流出に少なからず影響していることが示唆できる。漁川ダム流域の表層付近は、透水性の高い軽石系堆積物に覆われており、鉛直浸透が大きいことが反映されているとも考えられる。水文学的要因のほか、地質や土壌といった特徴

1)定山溪ダム流域 1998.8.1～10.31



2)豊平峡ダム流域 1998.8.1～10.31



3)漁川ダム流域 1998.8.1～10.31

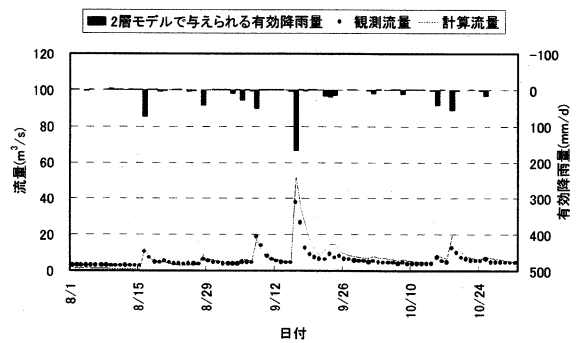


図-8 流出解析の結果

表-3 パラメータの探索過程(豊平峡ダムの例)  
(1998.8.1～1998.10.31の期間で探索、 $a_4$ は固定)

NO	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$b_1$	$b_2$	$z_1$	$z_2$	$z_3$
1	0.5000	0.1000	0.1000	0.0730	0.1000	0.1000	30.0000	20.0000	20.0000
2	0.2113	0.1563	0.1000	0.0730	0.1283	0.1029	32.2500	17.1200	22.7100
3	0.2021	0.1587	0.1000	0.0730	0.1155	0.0969	41.5800	20.6100	23.5400
4	0.2605	0.1601	0.0109	0.0730	0.1080	0.1076	50.8700	21.6200	22.7200
5	0.3206	0.1427	0.0393	0.0730	0.1133	0.1036	51.5200	19.8300	45.5100
6	0.3176	0.1456	0.0393	0.0730	0.1020	0.0980	54.0000	20.9800	45.5100
7	0.3156	0.1458	0.0402	0.0730	0.1033	0.0978	53.7700	20.6900	45.6300
8	0.3157	0.1458	0.0407	0.0730	0.1035	0.0977	53.7400	20.6400	45.5700
9	0.3158	0.1458	0.0409	0.0730	0.1035	0.0976	53.7300	20.6300	45.5300
10	0.3158	0.1458	0.0410	0.0730	0.1035	0.0976	53.7200	20.6200	45.5300
11	0.3158	0.1458	0.0410	0.0730	0.1035	0.0976	53.7200	20.6200	45.5500
12	0.3158	0.1458	0.0410	0.0730	0.1036	0.0975	53.7200	20.6200	45.5500

は固定値

表-4 地下水パラメータの諸元

	地下水流出成分の諸元			
	時定数(day)	AR式の次数	AR係数の総和	$a_4$
定山溪ダム	70	4	0.915	0.089
豊平峡ダム	45	4	0.930	0.073
漁川ダム	123	4	0.925	0.078

に応じて貯留効果を評価していくことが重要と言える。

## 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) 2層モデルの適用により、降水、積雪・融雪、蒸発散といった一連の水文現象を、同じ水・熱フラックスのもとで包括的に推定した。とくに水循環における積雪の変化と影響が推定できるようになった。
- 2) ルーチンデータに基づき、流域レベルで森林植生の影響を考慮しつつ、水・熱フラックスが推算できた。
- 3) 2層モデルの結果を与え、Newton-Raphson法によってタンクモデルのパラメータを効果的に探索できることがわかった。この際、地下水流出のパラメータはAR係数から別途決定できることを示した。
- 4) 積雪変化を含む2層モデルの結果、および上記で適切にチューニングされたタンクモデルにより、積雪寒冷地流域の長期水文学量（水循環）が再現された。

今後、本手法を進展させ、とくに積雪や土壌の貯留効果をうまくあらわすことで水資源管理や再現性の高い洪水予測といった実務面での活用も期待できる。

#### 参考文献

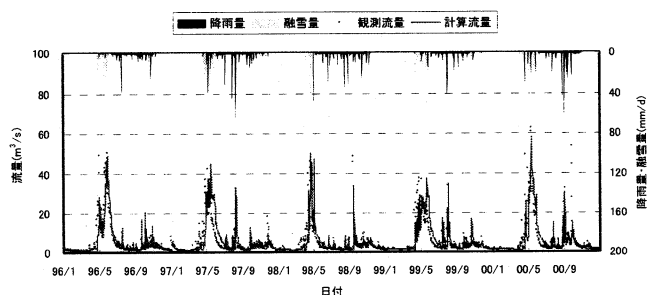
- 1) 近藤純正編著：水環境の気象学，朝倉書店，1994。
- 2) 山崎剛，櫻岡崇，中村亘，近藤純正，積雪の変成過程について，I モデル：雪氷，**53**(2)，pp.115-123，1991。

て，I モデル：雪氷，**53**(2)，pp.115-123，1991。

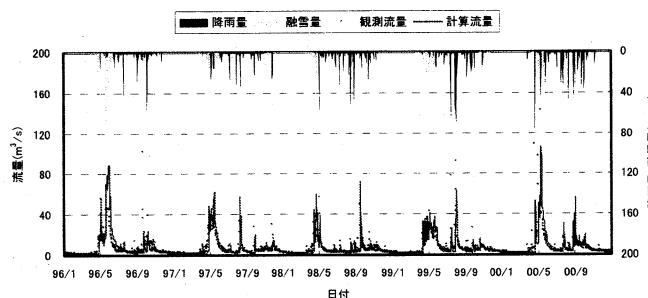
- 3) Bathurst, J. C. and Cooley K. R.: Use of the SHE hydrological modelling system to investigate basin response to snowmelt at Reynolds Creek, Idaho, J. Hydrology, **175**, pp.181-211, 1996.
- 4) 田中丸治哉，遺伝的アルゴリズムによるタンクモデル定数の同定，京都大学防災研究所年報，**36**(B-2)，pp.231-239，1993。
- 5) 日野幹雄，長谷部正彦：水文流出解析，森北出版，1985。
- 6) 口澤寿，中津川誠：熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散の推定，北海道開発土木研究所月報報文，**588**，pp.19-38，2002。
- 7) 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，**12**(3)，pp.210-220，1999。
- 8) 新井正：雪氷水文現象，基礎雪氷学講座VI，第3章，融雪量と融雪出水，古今書院，pp. 49-91，1994。
- 9) 服部重昭：森林流域における水循環特性と森林管理，第4回水文・水資源セミナー講演概要集，pp.19-29，2002。
- 10) 渡辺和好，館谷清，松木賢治，星清，タンクモデル定数の最適化手法の改良，第33回水理講演会論文集，pp.55-60，1989。

(2002. 9. 30受付)

1) 定山溪ダム流域 1996.1.1～2000.12.31



2) 豊平峡ダム流域 1996.1.1～2000.12.31



3) 漁川ダム流域 1998.1.1～2001.12.31

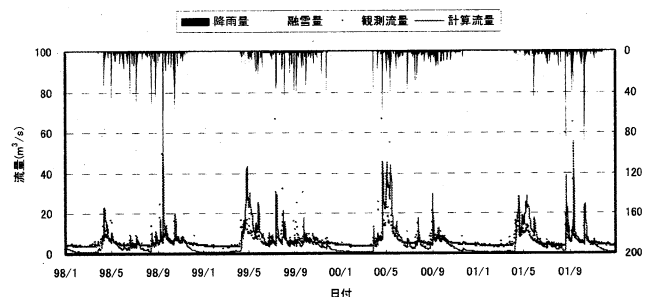
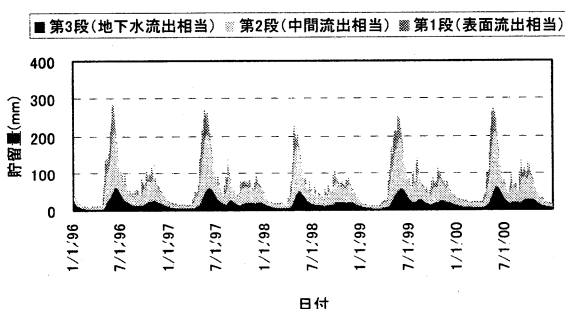
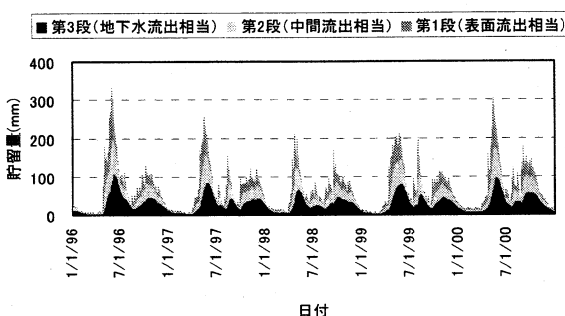


図-9 流出計算の結果

1) 定山溪ダム 1996.1.1～2000.12.31



2) 豊平峡ダム 1996.1.1～2000.12.31



3) 漁川ダム 1998.1.1～2001.12.31

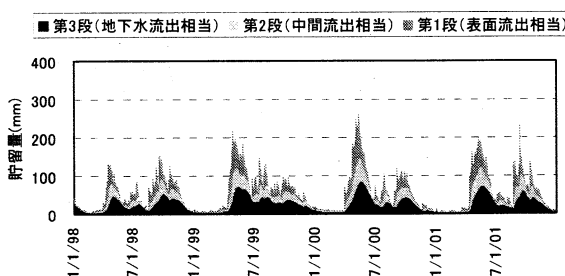


図-10 各成分貯留量の推移