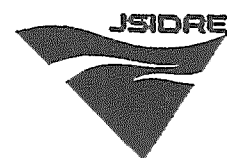


積雪層中の融雪水降下過程を考慮した山岳地流域の  
時間融雪流出解析

秀島好昭 星 清

農業土木学会論文集 第164号 抜刷

平成5年4月



# 積雪層中の融雪水降下過程を考慮した山岳地流域の 時間融雪流出解析

秀島好昭\* 星 清\*

Estimation of Hourly Snowmelt Discharge in a Mountainous Basin using the Distribution Function Model for the Infiltration Process of Snowmelt Water

Yoshiaki HIDESHIMA\* and Kiyoshi HOSHI\*

\* Civil Engineering Research Institute, Hokkaido Development Bureau

**Abstract** The present paper addresses a method for estimating the hourly snowmelt discharge in a mountainous catchment, using hourly data of temperature and duration of sunshine at a measuring station situated at a low altitude.

The proposed method is applied to estimation of the hourly snowmelt discharge in the Toppu River catchment, located in the Mashike Mountains of West Hokkaido. In this study, a time series of the estimated hourly snowmelt discharges were in good agreement with the observed ones.

Characteristics of the present study are summarized as follows:

① The method is built in the underlying physical processes from the snowmelt on the surface of snow deposit to the snowmelt through both overland and channel phases of the river. The delay time of snowmelt water passing through the snow deposit is much longer in early snowmelt season, because the snow depth is large. The present approach can estimate the snowmelt discharge at the bottom of snow deposit, using the runoff distribution function model which allows the time of concentration to vary with the depth of snow. The hourly response of a river basin to snowmelt was solved by kinematic wave routing for overland flow as well as channel flow.

② The peak discharge and time to the peak of the computed hydrograph compare favorably with those of the observed one for a one-month melting season.

③ The snowmelt routine developed herein is simple to transfer spatially distributed snowmelt to the runoff model, which makes use of hourly air temperature at the measuring site, lapse rate and hourly radiation amount estimated from the duration of sunshine. The method is especially useful to estimate the hourly snowmelt amount in a mountainous catchment in situations where data on sites are not sufficient.

The present method is proposed as alternatives for hourly snowmelt discharge analyses.

## I. ま え が き

北海道における農業用水の取水方式は、ダム貯留の利用形態が多く、水年の融雪流出量を精度よく推定することが重要である。

近年の水源地域は、山間地に計画することも多く、山間地あるいは山岳地の融雪流出に関する検討が、その水利用計画また治水計画から重要となる。

低標高のダム位置(あるいは、流量観測地点)に、融雪

水が到達するまでには、斜面での流量変換と河道での流出量の合成・運搬の過程を経る。

その過程について、時間融雪量の推算、斜面流や河道流の推定が必要である。山岳地流域では、一般に、平地の観測所の水文・気象資料を用いて、流域の時間融雪量を推定し、また、この融雪量を入力として、流出機構に関する検討が行われる。

前報<sup>1)</sup>では、中山間地の農地を流域とした時間融雪流出を検討し、積雪表面の融雪水が地表面に降下する過程に流出関数法の適応性がよいことを示した。

その結果として、流出関数法を適用して、積雪深の大きい山岳地の融雪量の流出遅れを入力側で調整し、降雨

\*北海道開発局開発土木研究所

キーワード：流出関数法、融雪流出、洪水到達時間、キネマティック・ウェーブ法、時間融雪定数、日射量

～流出系のモデルに併合できることを示唆した。同時に、平地の観測所の時間気温データと日照時間から積雪表面の時間融雪量を推定する手法を述べた。

本論では、この積雪層中の融雪水降下過程に流出関数法を適用した融雪流出モデルを日本海西部の増毛山系に位置する徳富川流域の時間融雪流出の解析に適用した。

その結果、計算した時間融雪流出のハイドログラフの再現性はよく、したがって、本手法が積雪深の大きい山岳地の時間融雪流出解析の一手法として適用できることを論じた。

## II. 時間融雪流出モデルの概要

融雪期の融雪が、主として気温の熱伝達と日射により積雪表面で生じると仮定する。この融雪水が積雪層中を降下し、地表さらに河道を流下し、流量観測点に到達するまでの過程を、次のような一連のモデルで考える。

### ① 積雪表面での時間融雪量の推定モデル<sup>1)</sup>

積雪表面での時間融雪量は、日照時間と日射量の関係を使って、1日の日射量を推定し、この日射量を日照可能時間帯にわたり、正弦曲線に沿って分割し、時間日射量を求める。流域の気温は、平地の観測所の時間気温資料を気温の高度逓減率で補正して推定する。時間日射量および時間気温に、それぞれ、日射による時間融雪定数、気温による時間融雪定数を乗じて、また総和して時間融雪量を推算する。

### ② 積雪下面での時間融雪出水の推定モデル<sup>1)</sup>

観測によれば、積雪表面で融雪した水が、地表面に到

達するまでの融雪流出の遅れは大きい。とくに、積雪が深い山岳地流域では、この融雪流出の遅れを解析モデルに組入れるべきものと考えられる。このため、本論では、この融雪流出を再現するモデルとして、流出関数法を使い、融雪水(降雨)～流出の入力側でのモデルを作成した。

③ 地表面に降下した融雪水のその後の流出については、Kinematic wave法を利用した斜面流および河道流を計算し、時間融雪流出量の再現性を検討する。

本論の対象流域は、後述するように、平地から高所に位置するため、流域の地形等を代表するいくつかのブロックに分割し、これを結合した流出モデルとした。

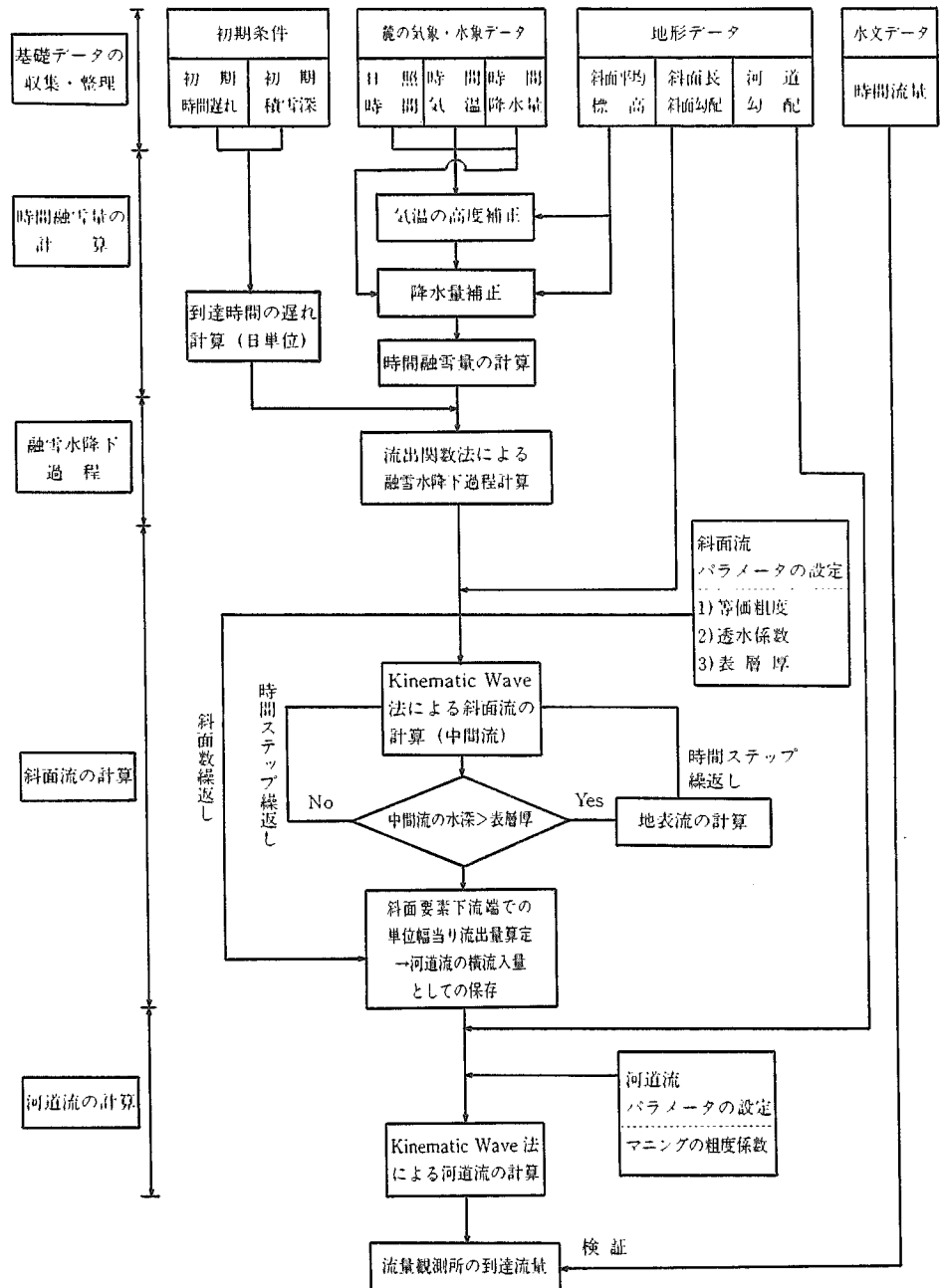


Fig. 1 時間融雪流出計算のフロー  
Calculation flow of hourly snowmelt discharge

この時間融雪流出計算のフローを Fig. 1 に示した。

### III. 流域のモデルと計算条件

#### 1. 流域のモデル化

徳富川流域は、Fig. 2 に再掲<sup>2)</sup>したように、流域面積 82.1 km<sup>2</sup>、平均標高 610 m の流域である。流域の最下流の南幌加橋地点において水位を観測し(後に時間流量データに変換)、日降水量・日照時間等の観測は、流域外であるが空知吉野気象観測所(標高 100 m)にて実施され、また、ダム予定地点(幌加徳富, 250 m)にて、時間降水量・時間気温等の観測を融雪期間に行った。

この流域を、700 m×700 m の方形な斜面要素 172 個に分割し、各斜面要素の平均標高、斜面方向、河道流入位置までの距離等について整理した<sup>\*1</sup>。また、河道についても分割し、分割した河道の勾配を整理した。Fig. 3 に各斜面要素の流下方向ベクトルを示したが、このうち河道への流入節点と同じである斜面要素群を 1 つにまとめて、融雪流出計算を行った。

Fig. 4 に示すように、斜面群 51 個、河道 52 個の流域分割モデルとし、その群の平均標高、平均斜面勾配、河道への平均到達距離等の計算を行い、斜面群の地形データを整理した。流域全体で平均した斜面長は約 820 m、斜面勾配は約 1/5.1、斜面幅の総延長は約 97 km のモデルである。



Fig. 2 流域の地形  
Schematic presentation of catchment area

\*1 前報<sup>1)</sup>の流出関数法の適合性は、農地の小流域(0.02~0.11 km<sup>2</sup>)を対象に確認できた。この流域の大きさは、一辺がおおよそ 350 m の正方形である。

また、本論の流域の融雪を標高差 100 m 程度に区切って特徴づけるとすれば、標高 1500 m からその値を除いて、流路方向には約 15 個の分割で済む。これは、本流域の流路方向延長約 15 km に当てはめれば、おおよそ 1000 m の距離に相当する。流域の全体を細分する都合と地形的特徴が消失しないと考える範囲から、斜面要素の大きさを決定した。

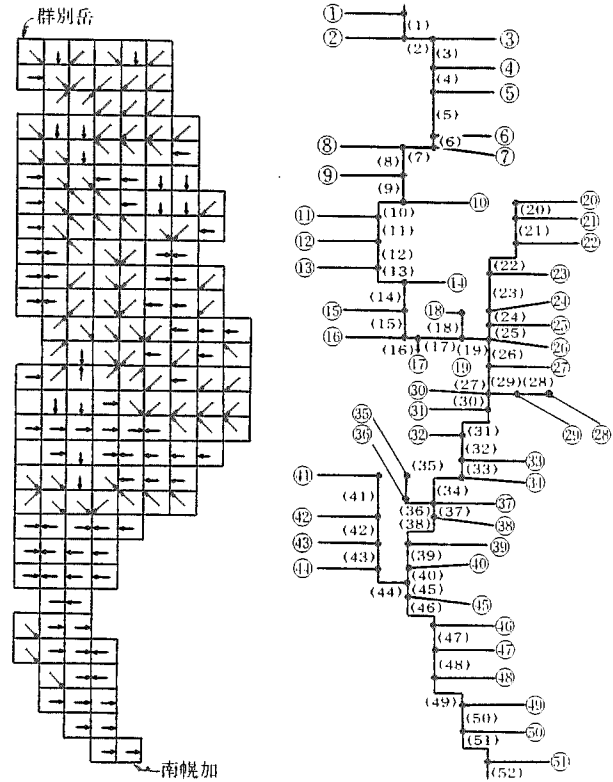


Fig. 3 斜面要素の流下方向ベクトル  
Flow vectors of elements  
Fig. 4 斜面群、河道の分割モデル(○内; 斜面群 No., ( )内; 河道 No.)  
Model of overland and channel blocks

#### 2. 積雪表面での時間融雪モデル

大気からの熱伝達による融雪量を  $M_T$  とし、日射による融雪量を  $M_R$  とすれば、時間融雪量  $M$  は両者を加えて、(1)式で表される。

$$M = M_T + M_R \dots\dots\dots (1)$$

また、 $M_T$  は気温による時間融雪定数 ( $DHF$ ) と時間気温 ( $T$ ) を使って、

$$M_T = (DHF) \cdot T \dots\dots\dots (2)$$

さらに、 $M_R$  は日射による時間融雪係数 ( $K_R$ ) と 1 時間当りの日射量 ( $R_t$ ) を使って、

$$M_R = K_R \cdot R_t \dots\dots\dots (3)$$

と表される。各時間融雪定数の値は、前報<sup>1)</sup>の調査では、 $DHF = 0.248 \text{ mm}^\circ\text{C}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 、 $K_R = 0.488 \text{ mm MJ}^{-1} \text{ m}^2$  の値が得られており、融雪量の計算に、この値を使用し

\*2 融雪を支配する一要素として、空気の対流による熱伝達があれば、ここでは風速と気温の積で融雪量を推算する機会が多い。一方、山岳地流域の風速分布を推量することは難しい。

本論では、融雪定数の決定に当り、麓(標高 100 m)とダム地点(標高 250 m)の風速資料等と流出量資料を用いた回帰分析等を行ったが、その関連性は低い。これらを理由に、空気の熱伝達による融雪を気温とその融雪定数から算出することとした。

た。一般に、山岳地の流域については、日射量・風速さらに気温等の資料は得にくい。このため、流域のブロックの時間気温は、ダム予定地点(標高 250 m)の時間気温データから気温の高度逓減率(-0.6°C/100 m)を使って推定した\*2。

また、日射量については、空知吉野地点の日照時間を旭川(当麻圃場)で求めた日照時間と日射量の関係<sup>1)</sup>に代入して、1日の日射量を求めた。日の出を6時、日の入りを18時と固定し、この時間帯において、推定した1日の日射量を正弦曲線に沿って分割し、時間当りの日射量を推算する。この時間帯は、解析期間にわたって一様とした。また、本論では、斜面勾配による日射量の補正は無視した\*3。

3. 積雪層中の融雪水の流出モデル

積雪層中の融雪水の移動は、積雪層内部の構造に支配されるが、融雪流出期における雪質の変化を考慮しないで、流出をモデル化する<sup>1)</sup>。調査によれば、地表面に到達するまでの時間は、Fig. 5のように再掲される。すなわち、到達時間は積雪深が大きいと時間が長いという関係を示している。本論では、Fig. 5に併記した関係式を、到達時間の推定に用いた。

積雪表面で融雪が生じてからの積雪下面での流出量は、次の(4)式から推定できる<sup>1)</sup>。

$$r_e = (i_{rf}) \cdot M \quad \dots\dots\dots (4)$$

$r_e$  ; 単位流出量(積雪下面での流出量),  $i_{rf}$  ; 単位応答関数,  $M$  ; 前出の積雪表面での時間融雪量(時間降水量を含む)

単位応答関数は、(5)式のとおりである。

$$i_{rf} = \alpha^{(a\tau+1)} / \Gamma(a\tau+1) \cdot e^{-a\tau t^{a\tau}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$\alpha$  ; 逓減係数(積雪表面での融雪が終了した時間以降の積雪下面からの流出量を基に、流量逓減則を使っ

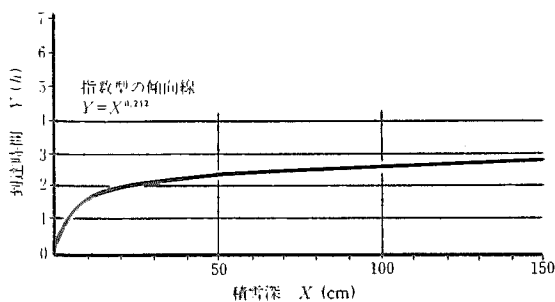


Fig. 5 農地で観測した融雪水の到達時間  
\* 到達時間とは、積雪底面で観測した時間最大融雪量の起時と南中時(12:00)との時間差  
Relationship between snowdepth and delay time

\*3 流域の斜面群モデルでは、河道での流入点を基に分類したため、斜面方向・勾配による日射量の補正を考慮していない。

て計算される。)

$\tau$  ; 到達時間,  $t$  ; 積雪表面で  $M$  の時間融雪量が生じてからの経過時間,  $\Gamma(\ )$  ; ガンマ関数

各時刻の積雪下面からの流出量は、(4)式で算出できる流出量を重ね合せて求まる。Fig. 5に示すとおり、積雪下面で観測した融雪量最大起時と南中時(12:00)との差を到達時間  $\tau$  とし、この  $\tau$  がその日の積雪深から求まるとした。すなわち、翌日の到達時間は、積雪密度とその日の融雪高から求まる雪の高さを差し引いて、翌日の積雪深を求め、積雪深を Fig. 5の関係式に代入して求めることができ、このように順次  $\tau$  を1日ごとに更新して積雪下面からの流出量を計算する\*4。また、本論では、 $\alpha$  の値は 0.867 を採用<sup>1)</sup>している。

4. 斜面流と河道流のモデル化

地表面に降下した融雪水の流下には、表面流出と中間流出からなる Kinematic wave 流出モデル<sup>3)</sup>を適用した。斜面群を矩形斜面と仮定した場合の斜面流の基礎式は、(6), (7)式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$q = \beta \cdot h^m \quad \dots\dots\dots (7)$$

$h$  ; 水深,  $q$  ; 斜面単位幅当りの流量,  $r_e$  ; 融雪水強度,  $x$  ; 斜面の流下方向距離,  $\beta, m$  ; パラメータ  
地表流と中間流を、それぞれ Manning型とダルシー型と考えた場合のパラメータは、次の(8), (9)式で表される。

(地表流)  $\beta = \sqrt{\sin \theta_s} / n_s$   
 $m = 5/3 \quad \dots\dots\dots (8)$

ここに、 $\theta_s$  ; 斜面勾配,  $n_s$  ; 斜面の等価粗度係数  
(中間流)  $\beta = \kappa_s \cdot \sin \theta_s / \lambda = \kappa \cdot \sin \theta_s$   
 $m = 1 \quad \dots\dots\dots (9)$

$\kappa_s$  ; 表層土層の透水係数,  
 $\kappa$  ; 見掛けの透水係数(=  $\kappa_s / \lambda$ ),  $\lambda$  ; 有効空隙率

本論では、この基礎式の解法に Lax-Wendroff 差分スキーム<sup>4)</sup>を用いた。差分の階差は、解の発散を避けるため、空間階差  $\Delta X = 100$  m, 時間階差  $\Delta t = 5$  s とした。この差分の階差は、後述する河道流も同様とした。

河道流の基礎式は、Kinematic wave 流出モデルによれば、次の(10), (11)式で表され、これを斜面流と同様の差分スキームで解いた。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_r \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$Q = K \cdot A^P \quad \dots\dots\dots (11)$$

$A$  ; 河道流積,  $Q$  ; 河道流量,  $q_r$  ; 河道単位長さ当

\*4 解析期間中に新たな降雪が生じた場合は、この積雪深を加えた  $\tau$  を使用する。計算方法は、日降水量を解析初期の積雪密度で除して積雪深に換算する。

りの横流入量(本論では、斜面からの中間・表面流量を集中して河道節点に与えた),

$x$ ;河道における流下距離,  $K, P$ ;パラメータ  
パラメータは、河道を三角形断面とし、その流れを Manning型で代表して次の(12)式で与えた。

$$K = \sqrt{\sin \theta / 2n}, \quad P = 4/3 \dots \dots \dots (12)$$

$n$ ;河道の粗度係数,  $\theta$ ;河道勾配

また、融雪水の全量が、中間流と表面流で河道に流出するものとした。

5. モデル定数の推定

斜面流と河道流のモデル定数については、次のような作業から、計算の基礎となる定数の推定を行った。また、モデル定数の変更に伴うハイドログラフの符合の状況を流出再現計算から確かめ、最適と判断する定数を決定した。

既往の知見<sup>5)</sup>から、斜面の等価粗度は、 $0.6 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ (林相のかなりよい山地流域)、河道の粗度係数は、0.04(山地流路、砂利、玉石)と定めた。表層土層の有効間隙率は、0.4と定めた。南幌加橋地点で観測した時間流出量と計算した積雪底面での時間融雪量資料を使って、ハイドログラフの立上がり部における累加融雪量(降雨も含む)と流量の関係を見ると、Fig. 6のように例示できる。

融雪期間の先行流出(一般の解析で考慮される地下水流出を指す)を推定することは難しく、本論では、その日の融雪流出がハイドログラフに現れてくる起時の初期流量を先行流出と考え、その後の流量からこの先行流出量を差し引いて流出量とし、また、この時間から累加融雪量を求めた。

Fig. 6は、融雪期間に大きな降雨がみられた日(4月23日)とハイドログラフの立上がり部が大きかった融雪日

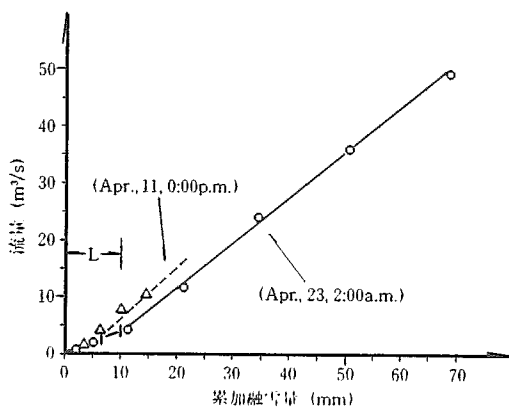


Fig. 6 ハイドログラフの立上がり部における累加融雪量(降雨量)と流量の関係(1990)  
\* 図中の起時を初期流量として、この値を観測流量から、差し引いた。

Relationship between cumulative snowmelt amount and snowmelt discharge

Table 1 表層の厚さと透水係数の推算ケース  
Estimation of depth and permeability coefficient of surface layer

Case	透水係数 $k(\text{m/s})$	表層厚 $d(\text{m})$	相対誤差
1	0.020	0.10	0.318
2	0.020	0.15	0.296
3	0.020	0.20	0.300
4	0.020	0.25	0.301
5	0.020	0.30	0.303
6	0.010	0.25	0.294
7	0.015	0.25	0.295
8	0.025	0.25	0.311
9	0.030	0.25	0.328

注1) 表中の相対誤差は本論(13)式により計算した。

また、この値は基底流量を考慮していない。

2) 解析期間は、4月1日~4月30日。

(4月11日)である。Fig. 6の折れ部までの累加融雪量  $L$ は、およそ10 mm程度である。この  $L$ の値を用い、前述した地形モデルの代表長等を使って、モデル定数を推定すると<sup>6)</sup>、表層土層の厚さおよび透水係数は、それぞれ約3 cm, 1~2 cm/sとなる。

これら定数の数値を最小値に試算から最適なモデル定数を決定したもので、Table 1に示すとおり、表層土層の厚さ10, 15, 20, 25, 30 cm, 透水係数1, 1.5, 2, 2.5, 3 cm/sの組合せで比較的再現性が高い結果が得られることが判明した。

IV. 時間融雪流出量の観測値と計算値の比較

1. 流域の積雪量

融雪が始まる前の3月上・中旬に行った、徳富川流域の積雪量等の調査結果を、Fig. 7に示した。調査位置・

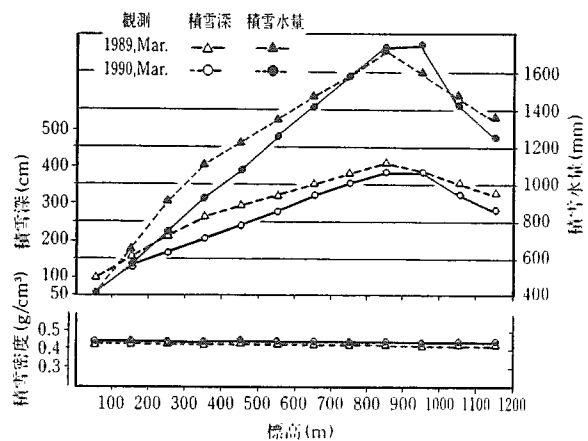


Fig. 7 流域の標高と積雪深・積雪密度  
Snow depth and snow density in catchment area

方法は、前報と同様である<sup>7)</sup>。Fig.7のように、標高約1000 m以上では積雪深は小さくなっているが、標高と共に積雪深が増加している。両観測年も、ほぼ同じ傾向を示しており、積雪密度も、0.42~0.45 g/cm<sup>3</sup>の値が得られた。前述の斜面群の平均標高に応じて、Fig.7の初期積雪深および積雪水量を与えて、次節の計算値と観測値との比較を行った。

なお、積雪量調査以降、融雪流出解析開始日(4月1日)までに空知吉野地点で18 mmの降雨が観測されているが、その量が小さいこと等を理由に、融雪流出解析の初期値として積雪量等の調査結果をそのまま適用した。

2. 時間融雪流出モデルの再現性の検証

Fig.8に1990年の4月に観測した日照時間、気温および降水量を示した。また、Fig.9には本モデルで計算した同期間の時間流出量の計算値と観測値の時系列を示した。4月23,26日に時間雨量約10 mmの降雨が観測されたが、解析対象期間にわたって、気温と日射による融雪が観測されている。

Fig.9の時間流出量の観測値と計算値を比較すると、両者はその流出ピークの起時間が合致している。流出量の値は融雪量の少ない4月13日から20日は、計算値の方が小さい値となっているものの、解析期間全体では両者のハイドログラフの形状は良好な符合を示している。な

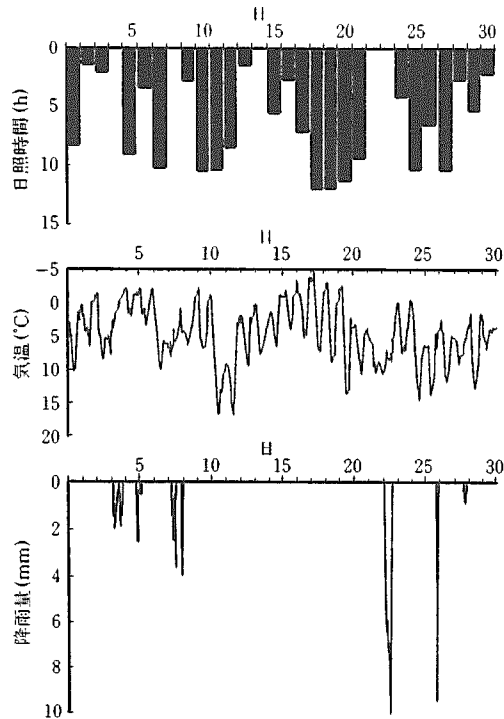


Fig. 8 日照時間・気温・降水量の観測結果 (1990, Apr.)  
観測所：日照時間 (空知吉野), 気温・降水量 (幌加徳富)

Observed data of duration of sunshine, air temperature and precipitation

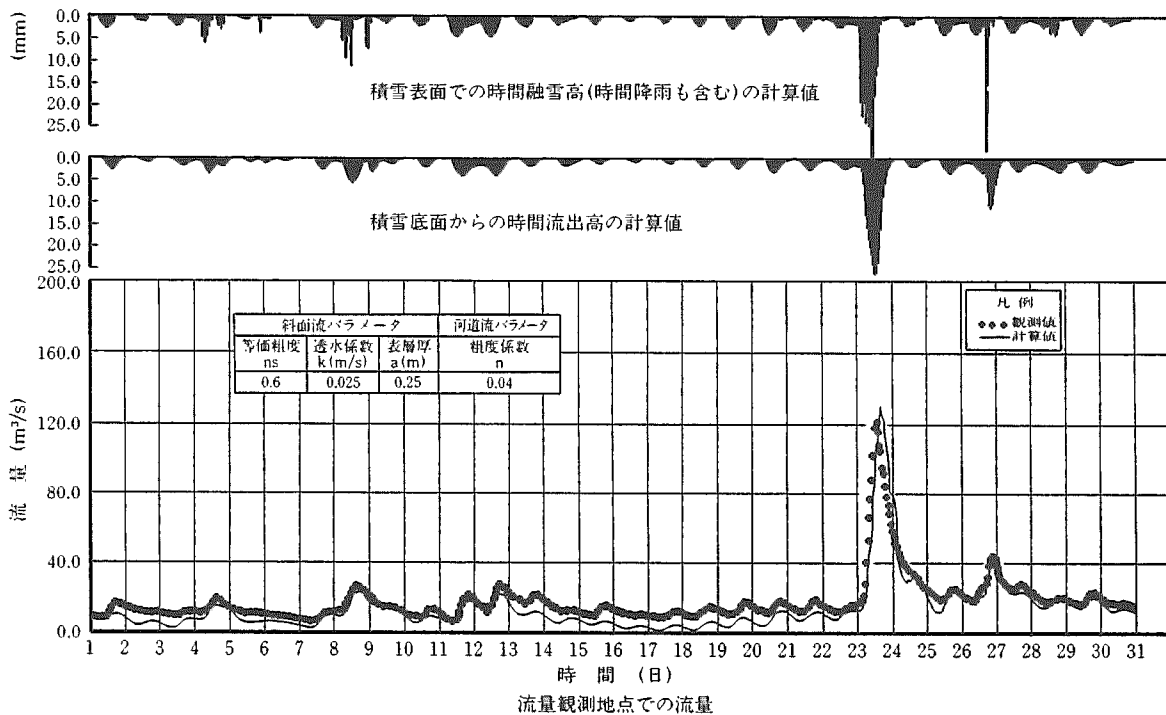


Fig.9 時間流出量の時系列 (1990, Apr.)

- \*1 上・中段の図：斜面群の各計算値を加重平均
- \*2 流量の観測値は、基底流量を含む値である。
- \*3 時間降雨は、流域の降水補正を行った値を使用

Comparison between observed discharge and calculated discharge

お、本流域では、厳冬期に約 1 m<sup>3</sup>/s の流出が観測される。この値は、融雪期の観測流量と比較すると、大きなものではないが、これが融雪期においても、基底流として続くと仮定すれば、観測流量からこの流量を差し引いて、計算した流出量との比較が必要である。

いま、計算値と観測値の適合度を、次に定義する相対誤差  $G$  で評価すると<sup>8)</sup>、 $G = 0.311$ 、上述の基底流量を除去した場合での相対誤差は、 $G = 0.275$  と小さい。

$$G = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{(y' - y)}{y} \right| \dots\dots\dots (13)$$

$N$  ; 時間データ数,  $y, y'$  ; それぞれ、流量の観測値および計算値

流域の積雪表面で計算される融雪量(降雨量も加算し、斜面群の面積割合に応じて加重平均した値)と積雪底面で計算される融雪流出量(同様に加重平均した値)の時系列をそれぞれ、Fig.9 の上段・中段に示した。図から積雪表面での尖鋭な時系列データが、流出関数の適用により、滑らかな積雪底面での流出となっていることがわかる。斜面流・河道流の遅延・伸長効果により、融雪流出の波形は滑らかなものとなるが、図のように積雪底面において同様な滑らかな波形が得られることは、今後、入力～出力系における、入力(融雪流出)のモデル化の重要性を示唆する。

また同時に、積雪底面での融雪流出の後には、他の簡易な流出モデルの適用をも示唆する。前述したように、再現性を相対誤差で評価すれば、本論の手法は実用的な精度をもつ時間融雪流出解析手法と考えられる。

## V. あとがき

本論の結論は、以下のように要約される。

① 積雪層中の融雪水の降下・流出過程に、その降下・流出の遅れを考慮できる積雪深の関数で表される流出関数を適用した。また、斜面・河道流出過程に Kinematic wave モデルを採用した。その結果、時間流出解析の計算

結果と観測値の符合はよく、本手法は、時間融雪流出解析の一手法として提案できる。

② 本手法のなかに入力した、平地の時間気温と日照時間から山岳地の時間融雪量を推定する手法の良否は現地で直接確認してはいないが、本論で仮定した積雪層中の流下過程、斜面・河道流出過程後の時間流出量の計算値と観測値の符合がよい。本論の仮定のもとでは、時間気温と日照時間から時間融雪量を推定する方法は、実用上十分に適応性のある手法と考えられる。

今後は、夏期の降雨時期の時間流出を解析し、融雪期間の時間流出に使用した斜面流・河道流のパラメータ等の妥当性を検討する必要がある。地表面での融雪水(降雨)の定量化が明確となれば、水年同一の流出モデルでの流出計算が可能かどうかの判別を行うことができる。

## 引用文献

- 1) 秀島好昭・澤田則彦:流出関数法を用いた農地の時間融雪流出解析—北海道の山岳地の融雪流出に関する研究(III)一, 農土論集 160, pp.1~10 (1992)
- 2) 秀島好昭・星 清:成分分離 AR 法による徳富川流域の流出解析—北海道の山岳地の融雪流出に関する研究(I)一, 農土論集 148, pp.11~17(1990)
- 3) 日野幹夫ら:洪水の数値予報(その第1歩), pp.85~104, 森北出版(1989)
- 4) 前出3)の p.81
- 5) 「建設省河川砂防技術基準(案)調査編」, 建設省河川局監修(1978)
- 6) 角屋 睦:流出解析手法(その7), 農土誌 48(7), pp.51~55(1980)
- 7) 秀島好昭・星 清: Degree-day 法にランドサットデータを活用した融雪流出解析—北海道の山岳地の融雪流出に関する研究(II)一, 農土論集 148, pp.19~24(1990)
- 8) 佐藤晃三・倉島栄一・松山幹男:4種類の積雪・融雪変換モデルの推算精度の比較, 農土論集 141, pp.45~52 (1989)

[1992.5.18 受稿]

(この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000字以内, 農業土木学会論文集編集委員会あて)は, 1993年10月24日まで受け付けます。)