

融雪出水の予測について

A Study on Predictions of Snowmelt Runoff

山梨大学工学部 正 員 砂 田 憲 吾
(株)日水コン 正 員 飯 野 将 徳

1. はじめに

融雪水を水資源の対象とする場合に比較して、河川洪水などの災害防止の観点からはより短期の出水予測性の向上をめざす必要がある。この場合、融雪に関与する熱エネルギーの各種要因や融雪水の流動・流下などの融雪流出機構のより厳密な取り扱いが望まれるが、実際河川の多くの場合には物理要因の資料の制約が免れず、限られた情報のもとでの融雪出水量の推定・予測が要請されている。ここでは気温だけを熱エネルギー指標とする積算暖度法の適用を考える。経験則に基づく積算暖度法は詳細な融雪流出過程の考察に依るものではないが、実用上用いられることも多いことから、短期の融雪出水予測の基本的な検討として意義がある。ただしその際、同手法の改良・拡張を試みながら予測システムの構成を行うこととする。すなわち、まず積算暖度法のなかで重要な項目である雪線高度の新たな推定法を示す。続いて、積雪斜面方位による融雪量の違いを考慮する。そののち、残雪面積(率)を状態量として、フィルタリング理論の適用による融雪出水の予測システムについて検討する。対象流域は只見川奥只見ダム上流域(A=478.6 km²)である。

2. 雪線高度の推定

2. 1 融雪速度

積算暖度法特に境¹⁾の方法では雪線が不凍結線に近似され必ずしも妥当ではない。この点について筆者らは以下のように検討している²⁾。奥只見ダムサイト観測所では'70~'79年の積雪深・その他の水文気象項目が観測されている。Fig. 1の□印は'70年の融雪期の積雪深(H_s)の(5日)平均日変化を示す。本格的な融雪開始とともに積雪深は減少し、暖度の変化、雪密度、降水などの影響を受けながらも、同図中の積算気温(Dh: degree-hour)の(5日)平均日変化(△印)とともに直線で近似できる。H_sの減少を+と定義して、

8ヶ年資料により両者の傾き(ΔH_s, ΔDh)をプロットすれば、Fig. 2のようになる。ΔH_sは融雪速度(cm/day)を示し、ΔH_sは積算気温の上昇率(ΔDh)で表わせる。Fig. 2の場合

$$\Delta H_s \div 1.5 \Delta Dh \tag{1}$$

を得る。式(1)はΔDh≐0付近では適用に限界があり、融雪最盛期の長期傾向として用いるべきである。一方、融雪に必要な暖度の総量を考えH_sと累加積算気温(ΣDh)との比をとれば、単位Dh当りの積雪深減少率(f_H)も得られる。10年間資料から、

$$f_H = 0.034 \quad (cm/Dh) \tag{2}$$

である。

Fig. 2は一地点の多年による融雪速度と積算気温上昇率を調べたものであるが、同一年の多地点資料によりこの関係を検証してみ

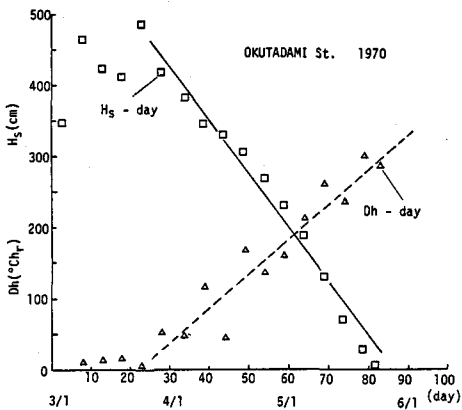


Fig.1 積雪深と積算気温の日変化

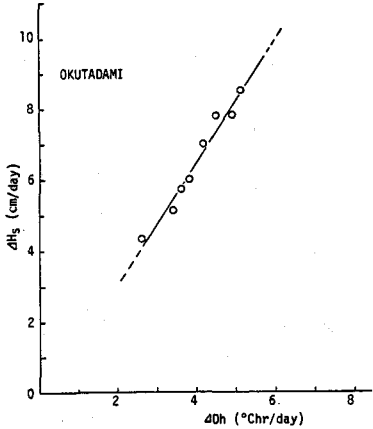


Fig.2 融雪速度と積算気温上昇率

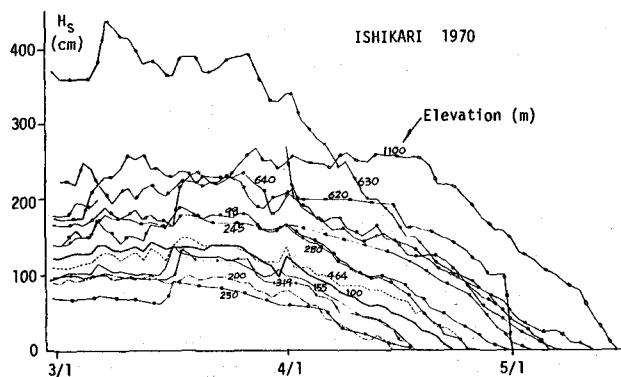


Fig. 3 積雪深の日変化(石狩川流域:山口³⁾による)

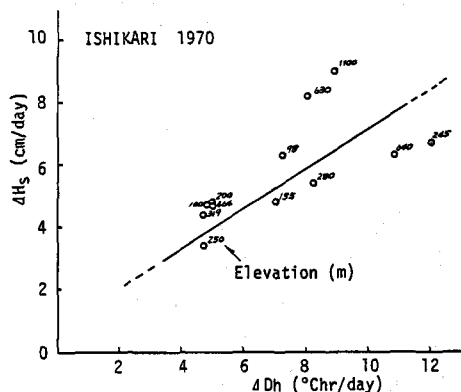


Fig. 4 (a) ΔH_s と ΔD_h (石狩川流域 1970 年)

る。Fig. 3 は山口³⁾により整理された '70 年の石狩川流域での標高の異なる地点の積雪深日変化である。Fig. 3 の変化に対する $\Delta H_s \sim \Delta D_h$ の関係は Fig. 4 (a) のようになる。Fig. 4 (b) は '69 年についてのプロットを示す。地点が異なるため斜面方位、地形などの違いにより Fig. 2 に比較してバラツキがあるが概略直線関係にある。Fig. 4 (a)、(b)とも直線の傾きはほぼ等しく、雪密度などに関係して奥只見流域の場合と異なっているが、式(1)と同様な関係が検証される。

2. 2 雪線高度の推定

奥只見流域内 22~28ヶ所の未融雪期(2、3月)の広域積雪深~高度を示すと '79 年で Fig. 5 のようになる。積雪深観測地点により変動はあるが平均的にはほぼ直線的に分布している。雪密度についての資料は少ないが、同一年の高度による違いは小さく、この時期では積雪相当水量についてもほぼ直線分布と考えられる。この点は山田⁴⁾が大雪山旭岳で得た樹木帯での積雪分布と類似の傾向にある。

さて、観測所において基準日(3/1)より本格的融雪開始日までの累加積算気温(ΣD_h)はほぼ 600 ($^{\circ}\text{C hr}$)であり、観測所の気温から温度減衰を考慮して各標高地点(平均の)融雪開始日も得られる。標高差 200 m ごとに平均積雪深より雪線出現日を求めれば雪線高度

(H_{SN})は Fig. 6 のようになり、境の方法に較べ Landsat 資料解析による結果⁵⁾と良好な一致を示す。

3. 積雪(残雪)斜面方位の考慮

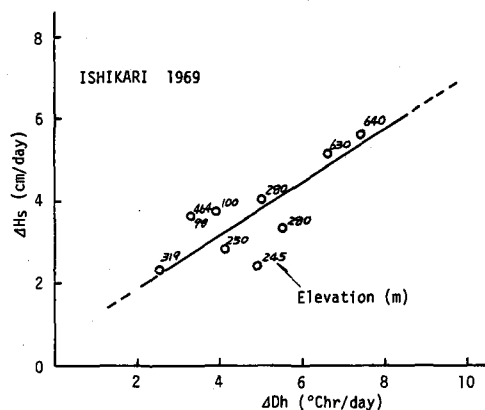


Fig. 4 (b) ΔH_s と ΔD_h (石狩川流域 1969 年)

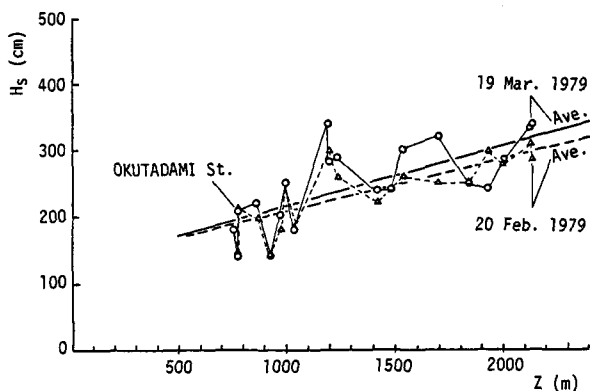


Fig. 5 未融雪期の積雪深分布

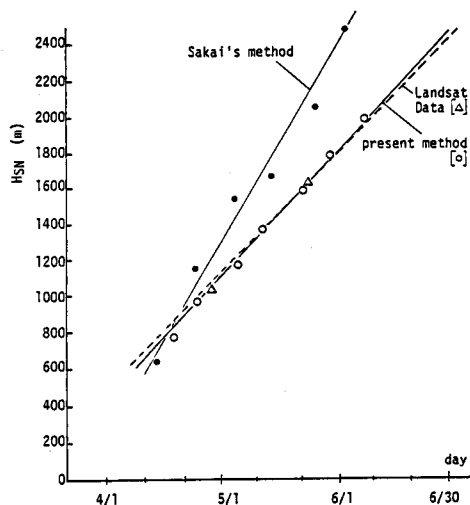


Fig. 6 雪線高度の推定

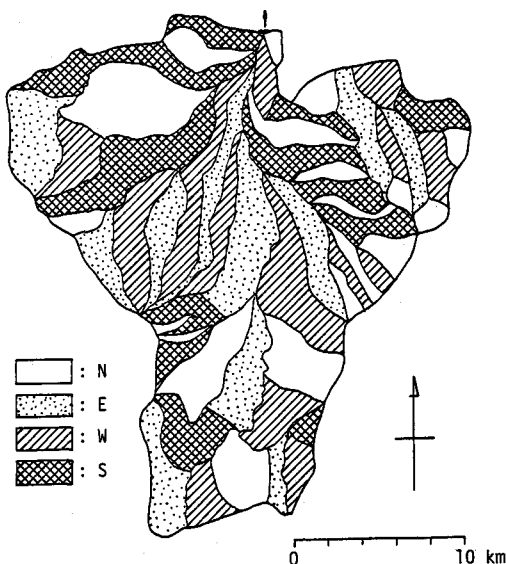


Fig. 7 斜面方位による流域の分割

竹本ら⁶⁾は流域航空写真から標高・斜面方位による残雪区域の変化や雪線標高差(200 m以上)を示しており、山田ら⁷⁾も斜面方位による融雪速度、degree-day factorの違いを指摘している。融雪出水解析についてもこの点を考慮する必要がある、ここでは各斜面方位ごとに雪線または残雪区域を定義して検討を進める。Fig. 7は対象奥只見ダム上流域の斜面方位による粗い分割例(56分割)を示す。個々の分割流域に基づいて斜面方位ごとの面積高度曲線を求めればFig. 8のようになる。今回の場合、ほぼ全標高にわたりE・W斜面の面積がN斜面、S斜面それぞれの約2倍となっている。

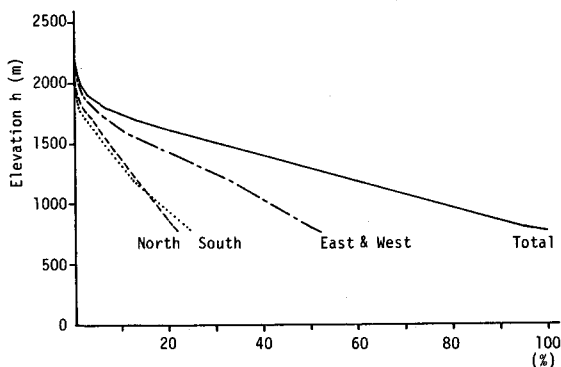


Fig. 8 斜面方位別面積高度曲線

4. 融雪出水のフィルタリング予測システムの構成とその適用

4. 1 システム方程式

状態量として残雪面積率(A_s)をとり、Kalman filter 理論を適用して1日先の出水予測を試みる。

方位別、各標高積雪深分布のもとで雪線高度による変化を平均的挙動として状態が遷移するものとするれば、状態方程式は次式で表される。

$$\mathbf{A}_s(k+1) = \mathbf{B}(k) \mathbf{A}_s(k) + \mathbf{u}(k) \quad (3)$$

ここに、 $\mathbf{A}_s(k)$ は k ステップでの斜面方位ごとの残雪面積率(ここではN、E・W、Sの3区分を考える)、 $\mathbf{B}(k)$ は k ステップで入手される翌日の気象情報(予報)により、2節のようにして求まる雪線を介して面積高度曲線から定められる係数行列(遷移行列)、 $\mathbf{u}(k)$ はノイズである。

斜面方位ごとの単位面積当りの融雪出水量(Q_s)は積算暖度法によれば、直接流出の最大遅れを n 日として式(4)のように表される。

$$Q_s(k) = f_s \{ f_1 Dh(k) A(k) + f_2 Dh(k-1) A(k-1) + \dots + f_n Dh(k-n+1) A(k-n+1) \} \quad (4)$$

ここに、 f_s は融雪流出率、 $f_1 \sim f_n$ は融雪流出 unit graph、 $Dh(k)$ 、 $A(k)$ はそれぞれ k ステップでの斜面方位ごとの積算気温および融雪面積率であり、 A_f を凍結面積とすれば A は次式で示される。

$$A(k) = A_s(k) - A_f(k) \quad (5)$$

式(5)を式(4)に代入して、

$$F(k) = f_s \{ f_1 Dh(k) A_f(k) + f_2 Dh(k-1) A_f(k-1) + \dots + f_n Dh(k-n+1) A_f(k-n+1) \} \quad (6)$$

とおく。 $F(k)$ は所与のパラメータ (f_s 、 $f_1 \sim f_n$) のもとで、 k ステップまでの気象 (対象標高地点換算で最高気温が 0°C 以下) 情報により定まる既知行列である。

他方、状態方程式(8)より、残雪面積率に関する漸化式が得られ、 $A_s(k-n+1)$ などは次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} A_s(k-1) &= B(k-1)^{-1} A_s(k) \\ A_s(k-2) &= B(k-2)^{-1} B(k-1)^{-1} A_s(k) \\ &\vdots \\ A_s(k-n+1) &= B(k-n+1)^{-1} \dots B(k-1)^{-1} A_s(k) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

結局、式(4)は次式のようにになる。

$$Q_s(k) = C(k) A_s(k) - F(k) \quad (8)$$

ここに、 $C(k) = f_s \{ f_1 Dh(k) + f_2 Dh(k-1) B(k-1)^{-1} + \dots$

$$+ (f_n Dh(k-n+1) B(k-n+1)^{-1} \dots B(k-1)^{-1}) \} \quad (9)$$

以上より、降雨流出も考慮して観測方程式として式(10)を得る。

$$Q(k) = P' C(k) A_s(k) - P' F(k) + G'(k) R(k) + v(k) \quad (10)$$

ここに、 $Q(k)$ は単位面積当りの総流出量、 P は全流域に対する方位ごとの面積比率からなるベクトル、 $G(k)$ は降雨流出 unit graph (ベクトル)、 $R(k)$ は k ステップまでの降雨時系列 (ベクトル)、 $v(k)$ はノイズ、 $'$ は転置を示す。

4. 2 予測システムの適用

式(8)、(10)を基本として融雪出水流量の予測を進めるが、それ以前の手順も含めて予測システムの概略の Flow を示せば Fig. 9 のようになる。このシステムでは基本的な情報として予め融雪期前の積雪深分布が必要で、スノー・サーベイ、Landsat 資料や航空写真による推定⁸⁾、その他の方法による適切な積雪資料の入手を前提としている。奥只見流域では積雪深分布として Fig. 5 の平均値を与えることにする。

$f_1 \sim f_n$ については融雪流出率を考慮した積算気温と流出量との、 G については融雪末期の降雨と流出量との相互相関⁹⁾を用いて unit graph を定めた。降雨による積雪表面の熱作用・動的作用は特に考慮していない。

融雪流出率 f_s は資料の解析によれば Fig. 10 の Δ 印のようであり、境¹⁾の検討をもとに実線のように近似し、経日変化するものとして与えた。

斜面方位の違いは気温や日射量その他多くの要因に関係するが、ここではまず最も単純に気温だけを取り

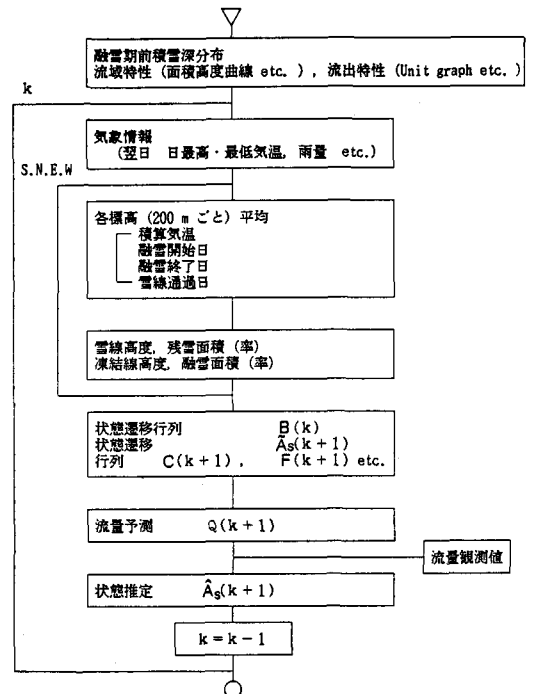


Fig. 9 融雪出水予測システム概要 Flow

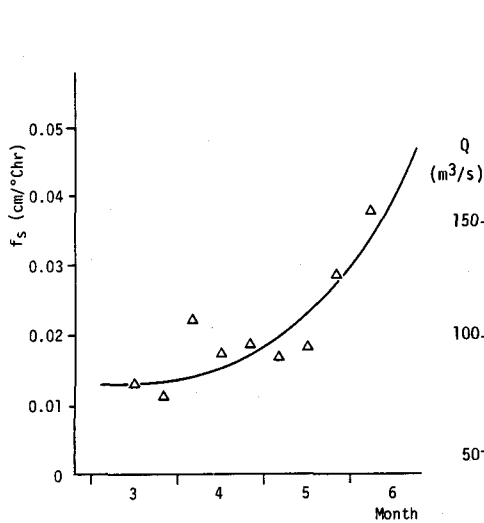


Fig. 10 融雪流出率

上げ、かつ終日一定の気温差をもつものと仮定した。E・W斜面を平均として、S斜面、N斜面での気温差を野外実測を参考に $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ 、 $2^\circ (\pm 1^\circ)\text{C}$ 、 $5^\circ (\pm 2.5^\circ)\text{C}$ と与えた場合の出水予測に及ぼす斜面方位考慮の効果を調べた。

ノイズのレベルとしては、状態量(残雪面積率)および流量観測値それぞれの最大レベルの10%、5%を固定して計算を進めた。Fig. 11は1日先予測計算結果の例であり、(a)は斜面方位を考慮して 2°C の気温差がある場合、(b)は気温差がない場合である。融雪初期に観測値との不一致がみられるが、融雪最盛期以降はほぼ妥当な予測を示している。(a)、(b)の場合とも予測に大差はないが、斜面気温差考慮の方が若干良好な結果を示している。

Fig. 11が見掛け上良好な結果を示すのは、流量観測値誤差を小さめに見積っていることにも依るものと考えられる。その結果は逆に状態量の推定精度の悪化を招き得る。本研究では融雪出水流量の予測精度のみを追及するのではなく、その結果をもたらし流出モデル、モデルパラメータ、状態推定値が物理的な妥当性を持つものであるかどうかにも関心をおいている。各日ステップで推定される状態量(残雪面積率 A_s)を示せば、斜面方位を考慮する場合、考慮しない場合それぞれについてFig. 12(a)、(b)のようになる。両者とも50日目(4月下旬)過ぎに A_s の極端な低下を示し、融雪流出モデルの不完全さに起因すると考えられる不合理な点もみられる。しかしながら、(a)、(b)の比較によれば、(a)ではN斜面の残雪面積率が融雪末期まで存在するなど妥当な結果を示し、Landsat資料による A_s の観測値(全方位の合計

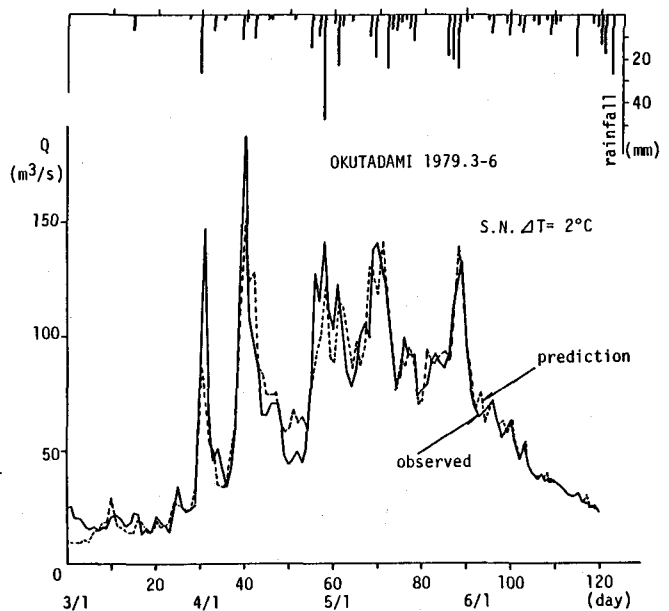


Fig. 11 (a) 出水予測 (N, S斜面気温差 2°C)

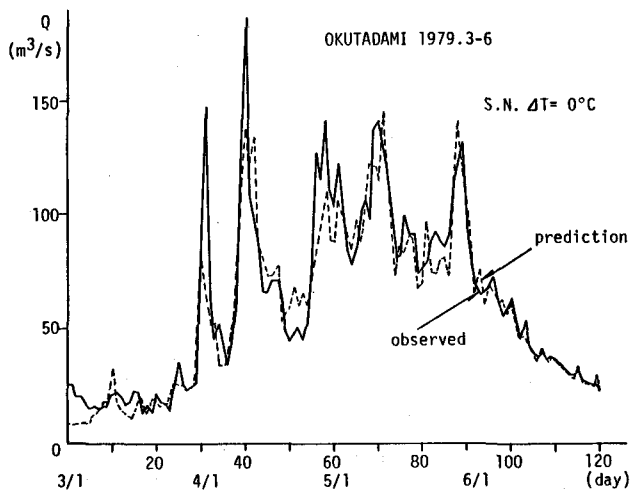


Fig. 11 (b) 出水予測 (斜面気温差なし)

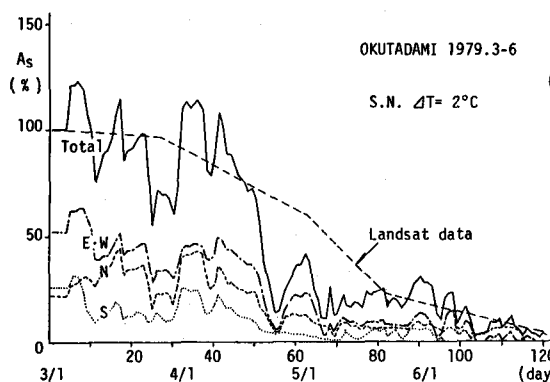


Fig.12 (a) 残雪面積率の推定 (N, S斜面気温差 2°C)

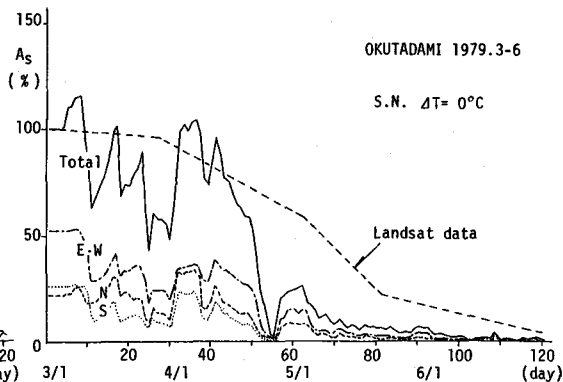


Fig.12 (b) 残雪面積率の推定 (斜面気温差なし)

・近似値)⁵⁾により近い傾向をもつことから、斜面方位の考慮が有効なことが判る。なお、斜面気温差 $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ の場合の出水予測精度、残雪面積率の推定の結果は $\Delta T = 2^{\circ}\text{C}$ の場合に較べ劣ることが知れた。

5. おわりに

新たな雪線高度の推定法に基づいて、積雪斜面方位も考慮した1日先融雪出水予測システムの検討を行った。その結果はば妥当な予測と状態推定が得られ、予測システムとしての基本的な枠組みができたものと考えている。用いた融雪モデルは未だ多くの仮定の上に立てられており、今後はより精緻なモデルで議論していく必要がある。特に、大出水の原因にもなる降雨・融雪同時の流出機構の解明も重要と考えられる。

最後に、貴重な現地調査資料を提供された電源開発(株)の関係者各位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 境：河川の融雪流出に関する研究、土木学会論文集、No.95、PP.9-20、1963.
- 2) 砂田・小林・渋井：融雪出水の予測について、土木学会年講、No.38-II、PP.7-8、1983.
- 3) 山口・長谷川：融雪流出の予知に関する研究、北海道開発局土木試験所報告、No.64、PP.1-59、1975.
- 4) 山田・西村・水津・若浜：大雪山旭岳西斜面における積雪の分布と推積・融雪過程、低温科学、物理篇、第37輯、PP.1-12、1978.
- 5) 武田・高橋：LANDSAT 雪線情報と積算暖度法による流域最大積雪水量算定に関する研究、土木学会論文報告集、No.811、PP.81-92、1981.
- 6) 竹本・牧野：雪線の構造とその移動特性について、土木学会年講、No.37-II、PP.695-696、1982.
- 7) 山田・久保田・深見・大前・金田：大雪山旭岳の融雪調査、低温科学、物理篇、第36輯、PP.181-188、1978.
- 8) たとえば、丸安・内田・田浦：航空写真による積雪分布および積雪量の解析方法に関する研究：土木学会論文集、No.153、PP.41-54、1967.
- 9) 吉川・日野・鋤柄：降雨一流出系における非線型予測の研究 — 情報理論的水文字への序説Ⅳ —、東工大土木工学科研究報告、No.8、PP.97-104、1970.
- 10) 電源開発(株)：奥只見地域、積雪・気象・流量調査資料、1980.