

流域積雪水量の推定に関する一考察

A Study on Estimation of Basin-wide Snow water equivalent

山本好克*

By Yoshikatsu YAMAMOTO

This paper presents a practical method for estimation of basin-wide snow water equivalent. First, the relation between observed hydro-meteorological data and topographical characteristics of Kawamata-Dam basin at the Upper-Kinu river are made clear. Then, the model for estimating of both snow water equivalent and snowmelt is presented, and parameters of the model are calibrated by the observed snow depth. Finally, a validity and a practical utilization of the method for estimating of snow water equivalent are discussed.

Keywords : snow water equivalent, snowmelt, density of snow

1. はじめに

国土面積のおよそ半分が積雪地、あるいは寒冷地であるわが国では、雪は重要な水資源であると同時に、融雪などによる災害をもたらす要因でもある。こうした雪を、水資源としての高度な利用を図る上で、また、雪による災害を最小限にとどめるなどの計画や管理においては、流域の積雪水量と融雪量の的確な把握が必要となる。しかし、これらの量を直接的かつ継続的に観測する手法やシステムは、未だ充分には整備されておらず、積雪水量の算定には、スノーサーベイや航空写真測量による方法が用いられており、また、融雪量は、熱収支による方法や気温による degree・day 法、degree・hour法¹⁾などにより推定されている。近年では、衛星データから得られた積雪面積情報を用いた、流域積雪水量や融雪量の推定方法の提案^{2) 3)}や積雪水資源量の推定⁴⁾がなされている。しかしながら、積雪当初から融雪終了までの全期間を通しての流域積雪水量を把握するための実用的な方法は、まだ確立されていないように思われる。

本研究では、山地河川流域における実用的な流域積雪水量の把握方法について、利根川水系鬼怒川上流部に位置する川俣ダム流域で観測された水文気象データを用いて検討する。ここではまず、対象流域の水文気象特性、および、観測で得られた積雪平均密度と積雪深から算定される積雪水量などの相互関係、また、流域特性との関連性について検討する。次に、こうした関連性を基に、基本的な水文気象観測項目のみを用い

* 正会員 工修 群馬工業高等専門学校助教授 土木工学科

(〒371 群馬県前橋市鳥羽町 580)

た積雪水量・融雪量推定モデルを、観測積雪深に適合されることにより、モデル式のパラメータを決定する。こうして得られたモデル式によって推定される積雪水量と観測によって得られた積雪水量との適合性などを検討することにより、流域積雪水量を把握する方法としての妥当性および有用性について考察する。

2. 対象流域・観測地点・観測データの概要

本研究での対象流域は、図-1に示すような利根川水系鬼怒川最上流域に位置する川俣ダム流域（面積 179.4 km²）である。

流域特性は、高度 1700 mの平五郎山頂（図中△印）を分水嶺として本支流流域が南北に分かれており、高度分布は、ダム地点の 980mから本川（南）側が最高高度 2326 m、支川（北）側が最高高度 2059 mとなっている。

ダム地点観測所では、1985年11月から日積雪深（cm）、日平均気温（℃）、日降水量（mm）が、また、高度が 1440m地点の上馬坂、1250 m地点の平五郎、および、1380 m地点の加仁湯の各観測所（図中○印）では、日積雪深（cm）の観測が開始された。さらに、3月初旬には、高度 1030～1550mの範囲にわたる 10 箇所の地点（図中◇印）において、積雪深（cm）と積雪平均密度（g/cm³）が実測されている。

ここでは、欠測のない 1986 年 11 月から翌年 5 月までの観測資料を用いる。

3. 水文気象量の流域特性

3.1 降水量・日平均気温・積雪深の流域特性

図-2には、ダム地点で観測された 11 月から翌年5月までの日降水量、日平均気温、日積雪深、および、流域内3観測所で観測された日積雪深を比較して示してある。

ダム地点（高度 980 m）における上記期間の総降水量は、420 mmと少なく、総積雪深の期間平均値（平均積雪深）も 20 cm程度である。ところが、上馬坂地点（高度 1440 m）での平均積雪深は、約 6 倍の 119 cmにもなっている。また、加仁湯地点（高度 1380 m）の平均積雪深は、約 4 倍の 82 cm、平五郎地点（高度 1250 m）のそれは、約 3 倍の 65 cmである。このことは、高度の増加とともに降雪量が増大していることを

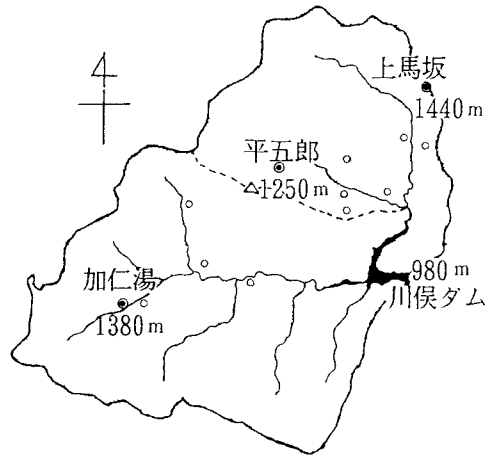


図-1 対象流域と観測地点

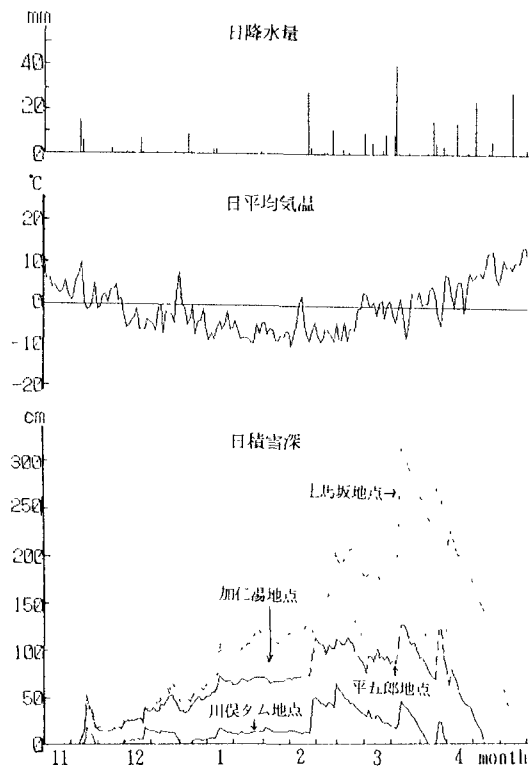


図-2 観測降水量・日平均気温・積雪深

意味している。しかし、川俣ダム地点より約 20 km 下流に位置する川治ダム地点観測所（高度 620m）における同一期間の総降水量は、522 mm と川俣ダム地点より逆に 100mm 程多くなっているが、平均積雪深は 11.5 cm と 9 cm 程少なくなっている。このことから、気温が大きく係わっていることが推量される。

ちなみに、川俣ダム地点の日平均気温の期間平均を計算してみると、0.98℃となり、川治ダム地点のそれが、2.63℃であるから、その低減率は 100m 当りに換算してみると、約 -0.5℃となり、一般に言われている $-(0.5 \sim 0.6)^\circ\text{C}/100\text{m}$ に合致していることから、対象流域の高度 100m 当りの低減率も、同様であろうと考えることができる。

各観測地点の日積雪深の変動特性を比較してみると、その挙動がよく一致していることが見られる。特に、流域内 3 観測所の積雪初期の 11・12 月の変動とその量はほぼ同一であり、融雪開始時期とその後の変動特性も同一傾向を示している。しかし、その量においては、高度との単純な比例関係とはなっておらず、観測地点の地理・地形の影響が推量される。いずれにしても、流域の積雪・融雪機構には、降水量と気温の流域分布が大きく係わっているものと思われる。

3.2 積雪深・平均密度・積雪水量の流域特性

前述したように、1987年3月2～4日には、図-1に示してある流域内 10 箇所の地点において、積雪深 H (cm) と平均密度 ρ_s (g/cm^3) が実測されている。

図-3には、各地点の高度と観測積雪深との関係を示してある。ばらつきはあるものの、高度が増すと積雪深も大きくなる傾向を示しており、高度差 520m で約 60 cm の差が見られる。しかし、図-2で見られるように、高度差 460m のダム地点と上馬坂地点における同じ時期の積雪深の差は、120 cm であるから、半分と少なく、このことから、観測地点の地理・地形の影響が推量される。

図-4は、平均密度と高度の関係を示したものである。最小密度は $0.21 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、最大は $0.26 \text{ g}/\text{cm}^3$ とその差は小さく、かつ、高度には関係がないように見受けられる。しかし、密度は積雪深と関係があらうと考えられるから、その関連性と回帰線を求めてみると、図-5に示してあるように、 $\rho_s = 0.107 H^{0.18}$ (相関係数 0.80) で表わされることが見い出された。このことから、積雪深と積雪水量 H_w (g/cm^2) の関係は、 $H = 6.89 H_w^{0.84}$ (相関係数 0.99)、または、 $H_w = 0.107 H^{1.18}$ と表わされ、その関連性と回帰線は、図-6に示してある。こうしたことは、積雪深から密度や積雪水量を推定することの可能性を示していると言えよう。

同様な関係が秋田谷・遠藤⁵⁾により、北海道平地部各地の積雪調査結果から、 $H = 8.60 H_w^{0.79}$ 、または、 $H_w = 0.068 H^{1.26}$ 、また、2月の積雪平

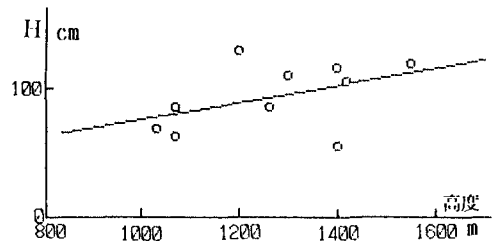


図-3 積雪深と高度の関係

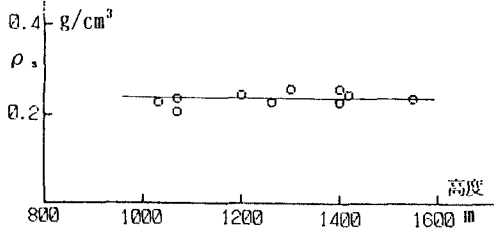


図-4 平均密度と高度の関係

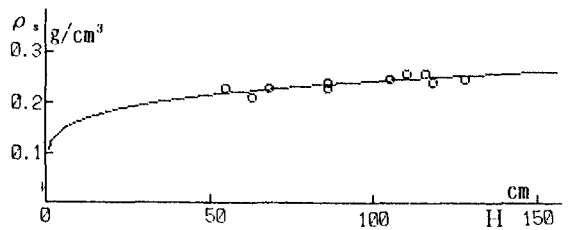


図-5 平均密度と積雪深の関係

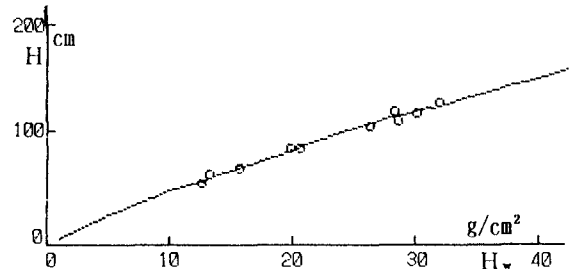


図-6 積雪深と積雪水量の関係

均密度の最小値 $\rho_{s, min}=0.068H^{0.26}$ が導びかれている。

4. 流域積雪水量の推定

3.2で述べたように、積雪深と平均密度が観測されれば、積雪水量が把握できる。しかしながら、特に、山地河川流域においては、困難と危険を伴う調査のため、積雪期間を通しての日単位の観測データは皆無である。ここでは、3.で得られた水文気象量と流域特性の関連性を基に、基本的な観測項目である降水量と気温とを用いた、流域積雪水量の推定について検討する。

4.1 推定方法

(a) 推定式

対象流域内の i 地点における日積雪水量 $H_{w,i}$ (mm) は、積雪と融雪を判定する気温 θ' によって次式のよう

$$H_{w,i}(t)=\sum P_i(t)|_{\theta'<0}-\sum M_{s,i}(t)|_{\theta'\geq0} \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

ここに、 $\theta'=\theta-\theta_s$ 、 θ :日平均気温(℃)、 θ_s :融雪開始気温(℃)、 P :日降水量(mm)、 M_s :日融雪量(mm)、 n :積雪日数、である。

降水量 P は、 $\theta'<0$ の時には、降雪量 P となり、積雪水量 H_w に寄与し、 $\theta'\geq0$ の時には、降雨量 P として、融雪量 M_s の熱源となるものとする。

さて、この融雪量は、積雪層における熱量によって決まり、気温、日射、水蒸気の凝結、雪面からの放射、降雨などがその熱源となるであろうが、ここでは実用的な観点から、菅原⁶⁾と同様な次式によって表わすことにする。

$$M_{s,i}=m_i\theta'_i+P_i\theta'_i/80 \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

ここに、 m :融雪定数(mm・℃/day)、 P :日降雨量(mm)、である。

(b) 地点日降水量・日平均気温の推定法

3.1における対象流域の水文気象特性の検討から、降水量は高度の増加と共に増大することが、また、気温は低減することが確かめられた。しかし、降水量は、高度との明瞭な関係が未だ見い出されていないので、ここでは、 i 地点の日降水量 P_i の推定として、次式を用いることとする。

$$P_i=aP_0 \quad \cdots\cdots\cdots(3)$$

ここに、 a :降水量増加係数、 P_0 :基準観測地点の日降水量(mm)、である。

気温に関しては、高度 100 m 当りの減少率がほぼ明らかにされているので、 i 地点の日平均気温 θ は、次式を用いて計算する。

$$\theta_i=\theta_0-\Delta\theta(h_i-h_0)/100 \quad \cdots\cdots\cdots(4)$$

ここに、 θ_0 :基準観測地点の日平均気温(℃)、 $\Delta\theta$:100 m 当りの気温減率(℃)、 h_i 、 h_0 : i 地点および基準観測地点の高度(m)、である。

4.2 パラメータの決定

本モデルによって流域積雪水量を推定するためには、あらかじめ、対象 i 地点の融雪係数 m と融雪開始気温 θ_s を求めておく必要がある。

ここでは、これらのパラメータを試行錯誤法により、観測積雪深との適合性から決定することとする。
しかし、本モデルによって計算されるのは、積雪水量 H_w であるから、積雪深 H に変換する必要がある。そこで、3.2において観測水文気象量の検討の結果から見い出された、積雪深と積雪水量の関係をを用いた次式で変換することとする。

$$H_i=\alpha_{k,i}H_{w,i}^\beta \quad \cdots\cdots\cdots(5)$$

なお、 α_k は、月毎に変化する係数であるとし、“月別積雪深変換係数”と呼ぶことにする。

解析に当っては、パラメータの最適値を、次式で計算される最小値 E_{min} で評価する。

$$E = \left\{ \sum (H_{cal}(t) - H_{obs}(t))^2 / n \right\}^{1/2} / \left\{ \sum H_{obs}(t) / n \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 H_{cal} 、 H_{obs} ：積雪深の計算値と観測値、である。

以上の推定方法を用いた、川俣ダム流域の積雪水量・融雪量モデルのパラメータの決定には、積雪期間最長の上馬坂地点の観測積雪深を用いることとする。その際、観測日降水量 P_0 と日平均気温 θ_0 は、川俣ダム地点の値を用いる。また、気温減率 $\Delta\theta$ 、係数 β は、3.1、2の検討結果から、 $\Delta\theta = 0.6^\circ\text{C}$ 、 $\beta = 0.84$ とし、降水量増加係数 a 、および、月別積雪深変換係数 α_k は、モデルのパラメータと同様にして試行的に求めることとする。

こうして解析した結果、最適パラメータのうち、融雪定数 m と融雪開始気温 θ_s は、積雪期間中一定であることが見出され、その値として、 $m = 3$ 、 $\theta_s = -2.3^\circ\text{C}$ が、また、月別積雪深変換係数 α_k は、表-1に示すような最適値が得られた。なお、試行して求めた降水量増加係数 a は、6.3 となり、3.1で推量した値とほぼ同じ値となることがわかった。

得られた最適パラメータ値を用いたモデルで推算される積雪深は、図-7に示してあるように観測値をよく再現している。また、表-1から3月の最適な変換係数 α は、7.21 となっていることがわかり、この値は観測積雪深と積雪水量との関係から得られた 6.89 とほぼ同じであることから、モデルの妥当性が推察される。

さらに、図から見られるように、計算値は観測値の激しい日々の変動を良好に再現しており、特に、融雪時期はよく一致していることから、融雪量把握方法としての有効性も推察される。

4.3 流域積雪水量の推定結果と検証

上記によって求められたパラメータ値の有用性、すなわち、モデルの有用性を検証するために、得られたパラメータ値 $m (=3)$ 、および α_k 値(表-1)を用いて、加仁湯および平五郎の2地点の積雪深を推定してみた。それらの結果は、観測値と比較して図-8に示してあるように、良好な再現性を示している。なお、各地点の融雪開始気温 θ_s は、上馬坂地点の -2.3°C を基準とし、式(4)と同じ方法を用いて計算し、加仁湯地点は -1.9°C 、平五郎地点では、 -1.2°C の値を用いた。さらに、降水量増加係数 a は、上記と同様

表-1 月別積雪深変換係数 α

月	α	月	α
11	3.04	3	7.21
12	4.66	4	6.93
1	7.21	5	5.11
2	7.73		

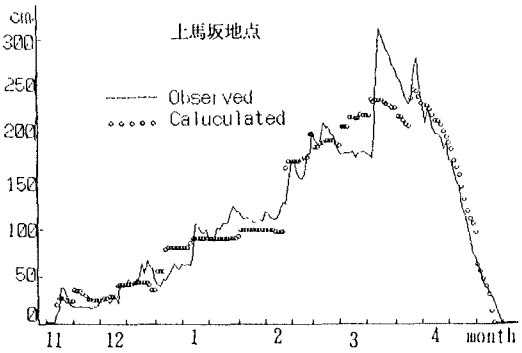


図-7 積雪深再現結果

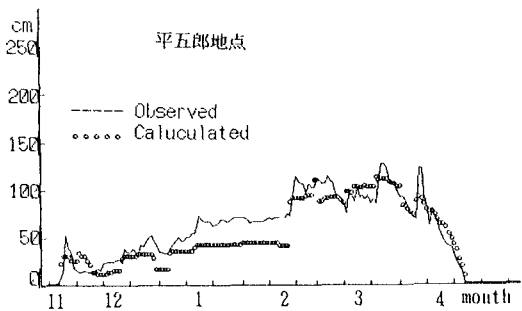
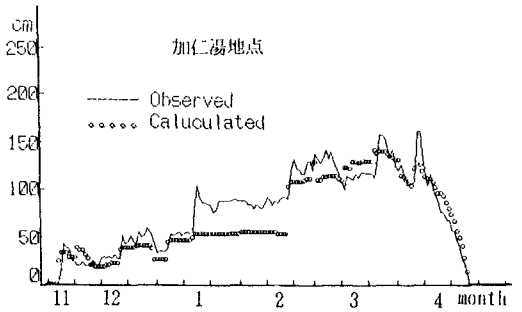


図-8 積雪深再現結果

に試行して決定した結果、加仁湯地点は、4.0、平五郎地点では 3.5 の値を得た。これらの値は、3.1 で推量した結果とほぼ同じ値を示しており、上馬坂地点の場合とを考慮合せ、本モデルは、降水現象をもよく表現しているものと思われる。

なお、1・2 月の再現性には難が見られるが、積雪最盛期とその後の融雪期において良好な適合性が見られることから、モデルによって推定された積雪水量は、観測値を精度よく再現しているものと思われる。

ちなみに、図-9 には、3 月 2～4 日に観測された積雪深 (H) と積雪水量 (H_w) の関係とその回帰線、および、2 地点で推定された 3 月の各 10 個の積雪深と積雪水量の関係を示してある。前述したように、 α の解析値は観測値とほぼ同じとなっており、当然の結果ではあるが、よく一致している。

5. おわりに

川俣ダム流域で得られた水文気象資料に基づき、水資源や融雪災害防御の計画・管理を実行する上で重要な水文量である流域レベルでの日積雪水量を積雪期間にわたって把握する方法について検討した結果、以下のような結論を得た。

- (1) 観測で得られた水文気象量の特性、および、その流域特性との関連性から、日降水量や日平均気温と高度との関連性が確認された。また、平均密度と積雪深、積雪深と積雪水量との関係式が提示された。
 - (2) 降水量と気温のみを用いた実用的な積雪水量・融雪量推定モデルが提案された。
 - (3) (1) で得られた関連性に基づき、モデルの最適なパラメータを観測値を用いて求め、こうして得られたモデルによる推定値は、観測値を良好に再現することが見い出され、モデルの妥当性を示すことができた。
 - (4) 上で得られたモデルを、流域内 2 観測地点に適用して得られた積雪深と観測値とを比較したところ、満足すべき一致を得、モデルの有用性を示すことができた。
 - (5) 降水量の高度による増加割合、日平均気温と高度の関係が見い出されたことにより、本モデルを用いて、流域内対象地点の積雪水量の推定、ひいては、全流域の積雪水量を把握することが可能となった。
- 最後に、貴重な水文気象観測データを提供して下さい建設省関東地方建設局鬼怒川ダム統合管理事務所にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 塚本良則：森林水文学、文永堂出版、pp. 201～210、1992
- 2) 小池俊雄・高橋裕・吉野昭一：積雪面積情報による流域積雪水量の推定、土木学会論文集、第 357 号／II-3、1985
- 3) 小池俊雄・高橋裕・吉野昭一：融雪量分布のモデル化に関する研究、土木学会論文集、第 363 号／II-4、1985
- 4) 風間聡・澤本正樹：衛星データを用いた東北地方の積雪水資源量推定、水工学論文集、第 38 巻、1994
- 5) 秋田谷英次・遠藤八十：北海道の平地積雪の特性（1977～'79 年冬期）、低温科学物理編、第 38 輯、昭和 54 年
- 6) 菅原正巳：流出解析法、共立出版、pp. 99～105、1972

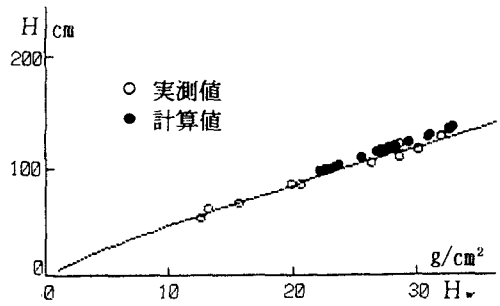


図-9 計算と実測の積雪水量