

積雪面積情報による流域積雪水量の推定

ESTIMATION OF BASIN-WIDE SNOW WATER EQUIVALENT
USING SNOW COVERED AREA

小池俊雄*・高橋 裕**・吉野昭一***

By Tosio KOIKE, Yutaka TAKAHASHI and Syoiti YOSINO

In this paper a model for estimation of basin-wide snow water equivalent using snow covered area is presented. At first the relation between percent snow cover and snow water equivalent is made clear using topographical characteristics of some Upper-Tone basins and the snow distribution obtained by surveying the Takaragawa basin. The dependence of snow water equivalent to altitudinal distribution of a basin is determined using snow covered area and hydrological data. The results of the application of the model to five basins are in good agreement with observed data.

1. はじめに

重要な水資源である積雪は同時に融雪洪水をもたらす災害要因でもあり、融雪流出の解明は積雪の有効な管理・利用のうえで重要な課題である。融雪流出解析は、初期値である積雪水量の推定、入力値である融雪量の推定、変換系である流出過程の検討の3段階に分けて考えることができる。このうち積雪水量の推定は、わが国では従来、人力による積雪調査や航空写真測量¹⁾が用いられ、また近年、代表性の高い冬期積雪水量観測点を流域の内外に選定して流出量との相関関係によって流域積雪水量の推定が行われている^{2),3)}。一方、欧米では1972年のLANDSAT-1の打ち上げを契機にリモートセンシング技術を用いた積雪領域の研究が飛躍的に進歩し、LANDSAT データから得られる積雪面積情報を組み入れた融雪流出モデルが提案されている^{4),5)}。わが国でも、1979年1月から地球観測センターにおいてLANDSAT データの受信が開始され、雪線情報を用いた流域最大積雪水量推定の研究が行われた⁶⁾。本論文では山地流域の

積雪分布特性と地形特性を明らかにすることによって、リモートセンシング技術の発達に伴って入手が容易になった積雪面積情報を用いた流域積雪水量の推定モデルを提案し、山地河川5流域に適用した。

2. 理 論

積雪水量と流域面積率の高度分布を用いた流域積雪水量の推定の概念を Fig. 1 に示す。ここで $S(h)$ 、 $A(h)$ はそれぞれ流域の平均積雪水量、流域面積率の高度分布を示している。また、 H_0 は雪線の平均標高で $H_H \cdot H_L$ はそれぞれ流域内最高標高・流域内最低標高を示す。流域積雪水量は図示されるように、各標高における積雪水量と面積率の積を標高 h に関して H_L から H_H まで積分することにより、

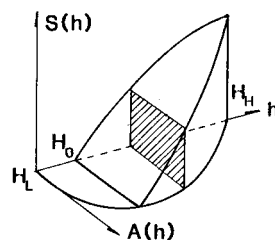


Fig. 1 Estimation of basin-wide snow water equivalent.

* 正会員 工博 東京大学助手 工学部土木工学科
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科 (同上)

*** 農林水産省林業試験場宝川試験地 研究員
(〒379-17 群馬県利根郡水上町大字藤原 2623)

$$S_s = \int_{H_L}^{H_H} S(h)A(h)dh \dots\dots\dots(1)$$

で求められる。ただし、雪線が流域内に現われる場合には実質的には H_0 から H_H までの積分となる。したがって、流域積雪水量の推定には式(1)中の積雪水量と流域面積率の高度分布を明らかにする必要がある。

(1) 積雪水量の高度分布特性

積雪水量の高度分布特性を明らかにするために、多雪域の山地小流域において1983年、1984年融雪期に積雪調査を行った。対象地域は利根川上流の林業試験場宝川森林理水試験地内の初沢流域と板幽沢流域で対象地域の概要およびスノーコースを Fig.2 に示す。初沢流域は南斜面が卓越した流域で、板幽沢流域は南東～東斜面が卓越している。また、植生は主にブナ林でヒバ・ナラが混交していたが、初沢流域では皆伐され、跡地にはスギ・カラマツが植林されている⁷⁾。積雪調査は積雪深と雪密

度の観測からなる。積雪深はスノーコースに沿って各測点で測深棒による10回の観測を行い、その平均値とした。また、雪密度は代表数地点で角型スノーサンプラー

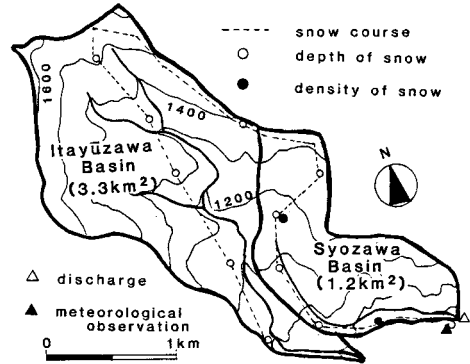


Fig.2 Observational sites in the Takaragawa experimental basin.

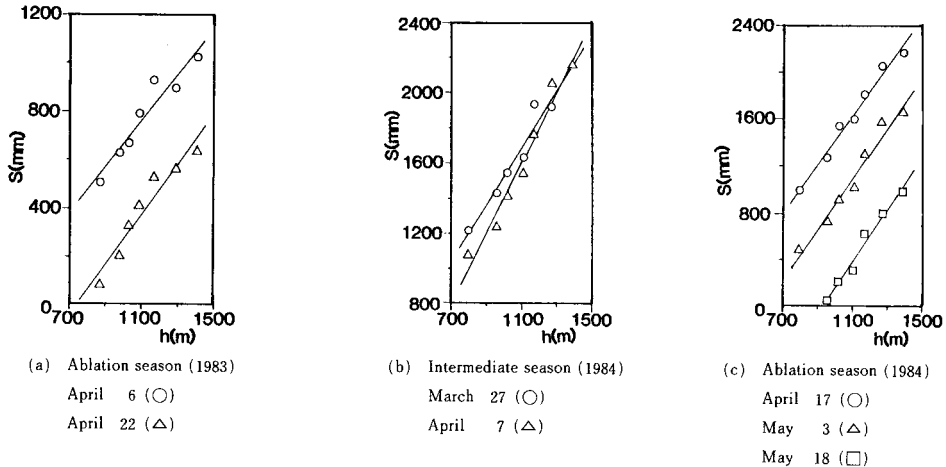


Fig.3 Altitudinal distribution of snow water equivalent in the Syozawa basin.

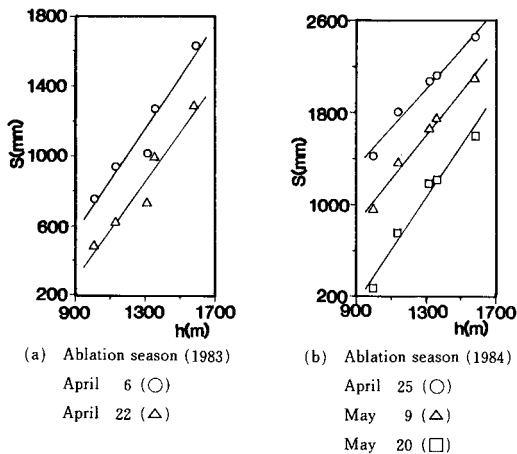


Fig.4 Altitudinal distribution of snow water equivalent in the Itayuzawa basin.

Table 1 Distribution factor 'a' in the Syozawa basin.

Date	'a'
April 6, 1983	0.95
April 22, 1983	1.04
March 24, 1984	1.61
April 7, 1984	2.01
April 17, 1984	2.07
May 3, 1984	2.16
May 18, 1984	2.24

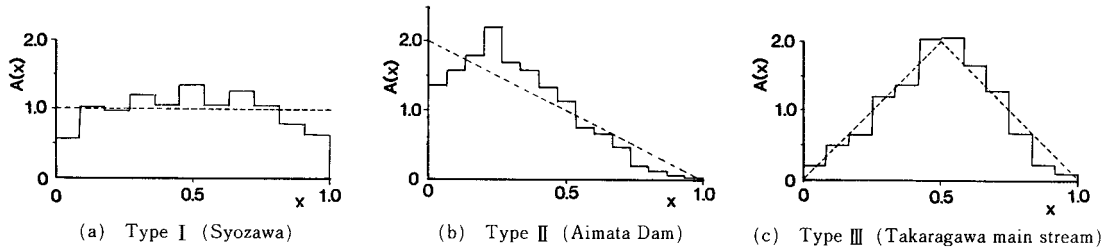


Fig. 5 Relationship between altitudinal distribution and basin area.

を用いて断面観測を行い、全層平均密度を算出し、積雪深データと合わせて各地点の積雪水量を得た。なお、各観測点は尾根や谷筋を避け、平坦な疎林内に選定された。

Fig. 3, Fig. 4 は観測結果で、初沢・板幽沢流域とも積雪水量は直線高度分布しており、それぞれの流域で傾きは Fig. 3(b) を除き融雪期を通してほぼ一定である。Fig. 3(b) は 1984 年 3 月下旬から 4 月中旬の初沢流域の観測結果で積雪水量は直線高度分布しているが、この期間標高の低い所では融雪が進行しているが、標高の高い所では堆積状態にあるので直線の傾きは増加している。4 月中旬には全流域が融雪状態となり、直線分布の傾きは最大となり、以後は Fig. 3(c) に示されるように、1983 年と同様に傾きがほぼ一定の直線高度分布となる。同様の結果は Yamada により北海道の山岳地帯の観測からも示されており⁹⁾、堆積期・融雪期の区分が明確な山地多雪域の特徴と考えられる。

Table 1 は初沢流域の観測結果から最小二乗法によって得られた積雪水量の高度分布直線の傾きを示しており、1984 年の傾きは 1983 年に比べ増加している。ただし、これは観測点の位置が両年で少しずれていることの影響とも考えられ、詳しくは今後の観測資料の蓄積を待たなければならない。

以上の観測結果から流域の平均積雪水量も直線高度分布であるとして、

$$S(h) = \begin{cases} a(h - H_0) & (H_0 \leq h \leq H_M) \\ 0 & (H_L \leq h \leq H_0) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

で与える。係数 a は流域の平均積雪水量の高度分布直線の傾きを表わし、全流域が融雪状態になった時点で最大となり、以後は一定値を示す。また、係数 a には年変化も考えられる。

(2) 流域面積率の高度分布特性

流域の面積高度分布特性に関しては、日本列島を 18 の流域区と 2 つの中間区、3 つの小流域区に区分した阪口の研究がある⁹⁾。Fig. 5 は利根川上流域の林業試験場宝川森林理水試験地の初沢流域・宝川本流域と相俣ダム流域の 3 つの流域についてそれぞれの流域ごとに面積の高度分布を調べ、3 パターンに分類したものである。Type I は標高にかかわらず面積高度分布が一定の場合

で、Type II は標高の増加に伴って面積率が単調減少する場合、Type III は中間部に面積率の大きな場所がある場合を示す。ただし、標高 h は式 (3) によって無次元化し、式 (4) の条件を加えた。

$$x = \frac{h - H_L}{H_H - H_L} \dots\dots\dots (3)$$

$$\int_0^1 A(x) dx = 1 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、Type I ~ III を一般に表わす分布を考え、Fig. 6 に示すように高次関数

$$A(x) = \begin{cases} \alpha x^p & (0 \leq x \leq x_m) \\ \beta(1-x)^q & (x_m \leq x \leq 1) \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

を用いて表わし、式 (4) と連続条件から係数 $\alpha \cdot \beta$ を求めると、

$$A(x) = \begin{cases} k \left(\frac{x}{x_m}\right)^p & (0 \leq x \leq x_m) \\ k \left(\frac{1-x}{1-x_m}\right)^q & (x_m \leq x \leq 1) \end{cases} \dots\dots\dots (5)'$$

ただし、

$$\frac{1}{k} = \frac{x_m}{p+1} + \frac{1-x_m}{q+1}$$

が得られる。Fig. 5 のそれぞれの型は Table 2 のように $p \cdot q \cdot x_m$ を定めると式 (5)' での表現が可能である。

(3) 積雪面積情報による流域積雪水量の推定モデル

Table 2 Coefficient 'p', 'q', 'x_m'.

Type	p, q, x _m
I	p=q=x _m =0
II	p=x _m =0, q>0
III	p>0, q>0, 1>x _m >0

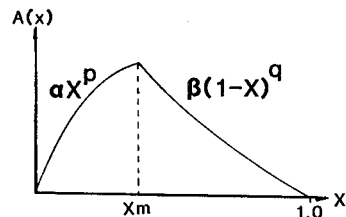


Fig. 6 General relationship between altitudinal distribution and basin area.

式(3)により雪線の位置を x_0 で表わし、式(5)'を x について x_0 から1まで積分すると積雪面積率 A_s が得られ、

$$A_s = \begin{cases} 1 - \frac{kx_m}{p+1} \left(\frac{x_0}{x_m}\right)^{p+1} & (0 \leq x_0 \leq x_m) \\ \frac{k(1-x_m)}{q+1} \left(\frac{1-x_0}{1-x_m}\right)^{q+1} & (x_m \leq x_0 \leq 1) \end{cases} \dots\dots(6)$$

で表わされる。式(6)を用いて雪線が x_m にあるときの積雪面積率を A_{sm} として、式(3)を用いて式(2)を変形し、式(5)'と合わせて式(1)の積分を実行して、さらに式(6)を代入すると、

$$S_s = \begin{cases} \frac{ax_m(H_H - H_L)}{p+2} \left(\frac{p+1}{kx_m}\right)^{\frac{p+1}{2}} (1-A_s)^{\frac{p+2}{2}} + \delta S_s & (A_{sm} \leq A_s \leq 1) \\ \frac{a(1-x_m)(H_H - H_L)}{q+2} \left(\frac{q+1}{k(1-x_m)}\right)^{\frac{q+1}{2}} A_s^{\frac{q+2}{2}} & (0 \leq A_s \leq A_{sm}) \end{cases} \dots\dots(7)$$

ただし、

$$\delta S_s = a(H_H - H_L) \left[x_m - x_m \left\{ \frac{p+1}{kx_m} (1-A_s) \right\}^{\frac{p+1}{2}} + \frac{k(1-x_m)^2}{(q+1)(q+2)} - \frac{kx_m^2}{(p+1)(p+2)} \right]$$

が得られ、積雪面積率 A_s の観測により積雪水量 S_s の

推定が可能となる。

次に式(7)における係数 a が積雪水量推定モデルに与える影響について考察する。係数 a は式(2)に示されるように平均積雪量の高度分布直線の傾きを表わすが、一般に積雪調査から流域の代表値を得ることは困難である。Fig.7は係数 a が変化する場合の推定モデルを、面積高度分布が Type I の場合について模式化したもので、Fig.7 (a) は係数 a が $\pm 20\%$ 年変動する場合の模式図を示し、Fig.7 (b) は積雪面積率が70%になるまで積雪量の高度分布係数 a が徐々に30%まで増加し、後は一定となる場合を示している。

3. モデルの適用

積雪面積情報による流域積雪量の推定モデルを実際の流域に適用し、その妥当性を検討する。

(1) 対象流域の概要と流域積雪水量推定モデル

積雪面積率の観測が融雪期に継続して行われた流域に流域積雪量の推定モデルの適用を行う。対象流域は利根川上流域の林業試験場宝川森林理水試験地の初沢流域・宝川本流流域、利根川支流赤谷川相俣ダム流域、北海道長流川の洞爺ダム流域¹⁰⁾、アメリカ合衆国コロラド州 Fraser 試験林の St. Louis Creek 流域¹¹⁾ の5流域で各流域の地形特性と積雪水量推定モデルを Table 3 に示す。

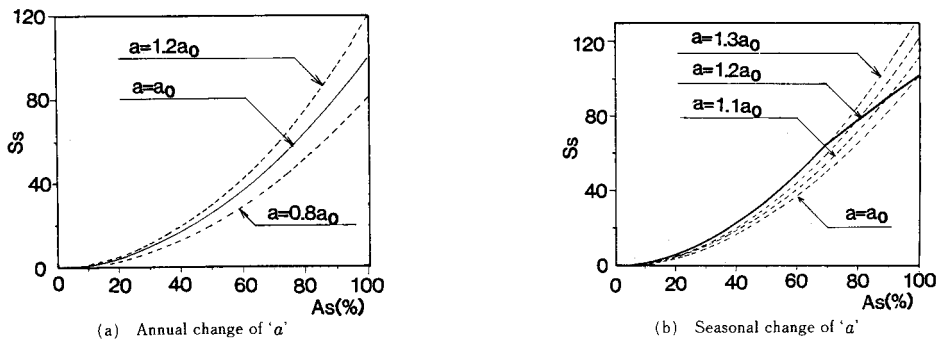


Fig.7 Model sensibility to variations in the distribution factor 'a'.

Table 3 Basin characteristics and model coefficients.

Basin	Basin characteristics					Model coefficients	
	Area (km ²)	Elevation Range (m)	p	q	x _m	S _s (mm)	
Syozawa	1.2	580	0	0	0	S _s = 290 a A _s ²	
Takaragawa main stream	19.1	1150	1	1	0.5	S _s = $\begin{cases} 271 a (1-A_s)^{\frac{3}{2}} - 813 a (1-A_s)^{\frac{1}{2}} + 575 a & (0.5 \leq A_s \leq 1) \\ 271 a A_s^{\frac{3}{2}} & (0 \leq A_s \leq 0.5) \end{cases}$	
Aimata Dam	110.8	1430	0	1	0	S _s = 477 a A _s ^{3/2}	
Tōya Dam	251.0	1150	0	1	0	S _s = 383 a A _s ^{3/2}	
St. Louis Creek	85.0	1220	0	0	0	S _s = 610 a A _s ²	

Table 4 Methods to determine snow covered area.

Basin	Methods
Syozawa	Visual Inspection(1982,1983)
Takaragawa main stream	LANDSAT MSS(1979) Visual Inspection(1982,1983)
Almata Dam	LANDSAT MSS(1979,1981) Photograph by Balloon(1983,1984)
Tōya Dam	Photograph by Airplane(1958,1959)
St. Louis Creek	Visual Inspection(1950)

(2) 積雪面積情報の収集

積雪面積情報の収集には、

- a) 目視観測¹²⁾
- b) カイト気球による斜め空中写真¹³⁾
- c) 航空機による斜め空中写真¹⁰⁾
- d) LANDSAT MSS データ¹⁴⁾

が用いられた。Table 4 に各流域の積雪面積情報の収集法と観測年を示す。ただし、洞爺ダム流域・St. Louis Creek 流域は参考文献^{10), 11)}からの引用である。

(3) 流域積雪水量の算定

積雪面積情報に対する積雪水量は水収支式

$$S_s = \sum Q + \sum E - \sum P - S_{g1} + S_{g2} \dots (8)$$

ここに、 $\sum Q \cdot \sum E \cdot \sum P$: 積雪面積観測日から融雪終了日までの流出高・蒸発散・降水量の総和、 S_{g1} : 積雪面積観測日における地下水貯留量、 S_{g2} : 融雪終了日における地下水貯留量

から算出され、これを観測値とした。ここで、蒸発散量の算定には次の2つの仮定をおいた。

- a) 積雪域からの蒸発散は無視して、無雪域のみ考慮する。
- b) 無雪域の平均標高を求め、0.6℃/100mの温度補正を行って無雪域の平均気温を算出する。

そこで、Hamon 式^{15), 16)}

$$E_p = 0.14 D_0^2 P_t \dots (9)$$

ここに、 E_p : 日平均蒸発散能 (mm/day)、 D_0 : 日照時間 (12 h/day)、 P_t : 日平均気温に対する飽和絶対湿度 (gm/m³)

を用いて日平均蒸発散能を算出し、

$$\sum E = E_p A_n d \dots (10)$$

ここに、 A_n : 平均無雪面積率、 d : 日数
で蒸発散量を求めた。地下水貯留量については、高橋・安藤・伊藤・伊藤により無降雨期間の減水部の適合性がよいことが示されている分数関数減水式¹⁷⁾

$$Q_0 = \frac{Q_0}{(1 + A_u \sqrt{Q_0} T)^2} \dots (11)$$

ここに、 Q_0 : 初期流出高、 A_u : 分数関数減水定数を時間 T について積分して、

$$S_s = \int_0^{\infty} Q_0 dT = \frac{\sqrt{Q_0}}{A_u} \dots (12)$$

で求めた。ここで、初期流出高について、初沢流域では河川表流水の電気伝導度を用いた流出成分の分離が高橋・小池・吉野により行われているのでこの値を用い¹⁸⁾、宝川本流流域・相模ダム流域では日最低流量を日換算して用いた。洞爺ダム流域では日流量資料しか得られないので融雪初期と融雪末期の勾配急変点を直線で結び、便宜的に地下水流出量を分離した。また、St. Louis Creek 流域では融雪流出の減水式を用いて各日の融雪相当流出量が計算されているので、

$$S_s = \sum Q_s + \sum E - \sum P \dots (13)$$

ここに、 Q_s : 日融雪相当流出量

(contribution from day's melt)¹¹⁾

で流域積雪水量を算定した。

(4) 結果と考察

積雪面積情報による流域積雪水量の推定モデルの適用結果を Fig. 8~Fig. 12 に示す。図中の曲線は推定モデルでいずれの流域においても観測値によく一致している。ただし、積雪水量の高度分布係数 a は最小二乗法を用いて定められている。

次に、堆積融雪期における積雪水量の高度分布係数 a の増加の影響について調べる。1984年相模ダム流域で

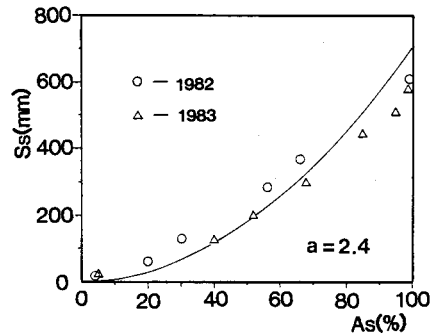


Fig. 8 Result of model application to the Syozawa basin.

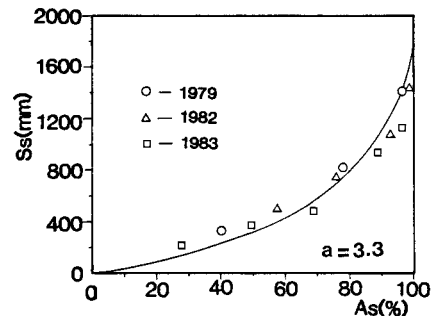


Fig. 9 Result of model application to the Takaragawa main stream basin.

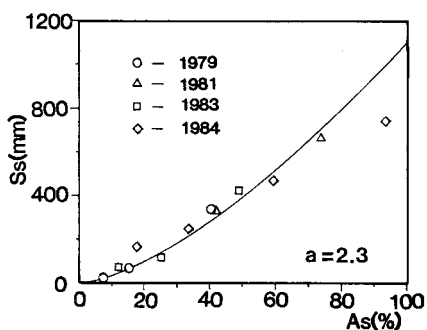


Fig. 10 Result of model application to the Aimata Dam basin.

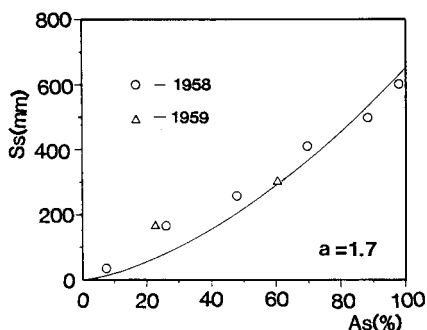


Fig. 11 Result of model application to the Tōya Dam basin.

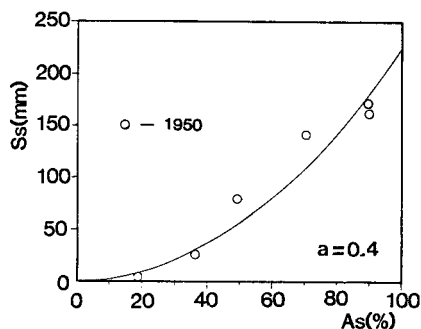


Fig. 12 Result of model application to the St. Louis Creek basin.

推定曲線より下の観測値があるが、これは同年が豪雪で観測日の4月9日以降も上流域では降雪があったため Fig. 7 (b) と同様の变化を示すと考えられ、堆積融雪期に積雪面積率が大きい場合の特徴であると考えられる。

さらに、2年以上のデータがある St. Louis Creek 流域以外の4流域において年による推定モデルの変動を調べると、南斜面が卓越する初沢流域においては1982年と1983年でわずかな差が認められるが、複合斜面で構成される他の3流域では1つの推定モデルで表現でき、年差は認められない。利根川上流域では1979年が少雪、1982年・1983年が平年並、1981年・1984年が豪雪であ

り、降雪状態の変化にもかかわらず宝川本流流域・相俣ダム流域では積雪面積率と流域積雪水量の関係を1つの推定モデルで表わすことができる。これは、平均積雪水量の高度分布の年変動が小さいためであると考えられる。また、北海道では降雪形態の違いにより高度分布が異なることが報告されているが、洞爺ダム流域については1958年・1959年の資料からは年変動は認められない。

4. 結 論

本論文では積雪水量と流域面積率の高度分布を明らかにして、融雪期に減少する積雪面積の情報を用いた流域積雪水量の推定モデルを提案した。本研究で得られた主要な結果を以下に要約する。

(1) 積雪水量は直線高度分布して、その傾きは堆積融雪期には増加し、全流域が融雪状態になると一定値を示すことが利根川上流域の林業試験場宝川森林理水試験地で行った積雪調査より明らかにされた。これは、北海道山岳地帯の積雪分布特性と同様の結果である。

(2) 流域の面積高度分布は式(6)で表わされ、地形特性は係数 p , q , x_m で示される。

(3) 積雪水量と流域面積の高度分布特性を考慮して、積雪面積情報による流域積雪水量推定モデルが式(7)で表わされた。

(4) 積雪水量推定モデルを積雪面積が継続して観測されている5流域に適用してモデルの適合性がよいことが示された。

(5) 堆積融雪期の積雪水量の高度分布係数の変化が推定モデルに与える影響は豪雪時に認められたが、分布係数の年変化は小さいことが示された。

謝 辞：本研究を進めるにあたり林業試験場 中野前防災部長、法政大学 西谷教授からは貴重な参考資料を頂き、北海道大学低温科学研究所の小島教授、山田助手と同大学院の本山氏、千葉工業大学の小泉助手、リモートセンシング技術センターの武田博士、国立防災科学技術センターの植原部長と佐藤技官からは、有益な助言とご指導を賜りました。また農林水産省林業試験場、建設省利根川ダム統合管理事務所、相俣ダム管理支所、北海道電力株式会社からは観測資料の提供を受け、千葉工業大学土木工学科測量研究室、建設省土木研究所水文研究室、気象庁業務課、熊谷地方气象台、建設技術研究所、自然環境科学研究所からは観測機器の借用を受けました。さらに積雪調査には東京大学学生釣友会の加戸・多和田・満田・越岡・水谷・小池諸氏、東京大学大学院生の金尾・桑原・伊藤・山田・モローネ・塚原・内田諸氏より多大なご協力を得ました。ここに記して心より感謝

致します。

参 考 文 献

- 1) 丸安隆和・内田正人・田浦秀春：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，第153号，pp.41～54，1968.
- 2) 竹内俊雄：利根川本川上流域に於ける融雪の長期予想について，防衛大学校理工学研究報告，第15巻，第2号，pp.89～92，1981.
- 3) 電源開発株式会社関東支社：奥只見地区の冬期積雪分布特性と流域総積雪水量の算定について，土木学会関東支部講演会【北陸豪雪と土木技術】資料，pp.25～62，1981.
- 4) Martinec, J. and Rango, A. : Discharge forecasts in mountain basins based on satellite snow cover mapping, NASA Conference Publication 2116, pp.223～238, 1980.
- 5) Hannaford, J.F. and Hall, R.L. : Application of satellite imagery to hydrologic modeling snowmelt runoff in the southern Sierra Nevada, NASA Conference Publication 2116, pp.201～222, 1980.
- 6) 武田 要・高橋 裕：Landsat 雪線情報積算暖度法による流域最大積雪水量に関する研究，土木学会論文報告集，第311号，pp.81～92，1981.
- 7) 永見郷康・吉野昭一・阿部敏夫：森林伐採にともなう暖候期間の流出量変化，林業試験場宝川森林理水試験地第3回報告，pp.61～64，1964.
- 8) Yamada, T. : Studies on accumulation-ablation process and distribution of snow in mountain regions, Hokkaido, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, pp.1～33, 1982.
- 9) 阪口 豊：流域の発達と日本島流域の特性，地理学評論，第38巻，第2号，pp.18～35，1965.
- 10) 北海道電力株式会社・札幌管区气象台：積雪基礎調査，pp.52～79，1959.
- 11) Garstka, W. U. et al. : Factors Affecting Snowmelt and Streamflow, pp.39～62, United States Government Printing Office, 1958.
- 12) 高橋 裕・吉野昭一・小池俊雄：積雪面積情報の利用による流域積雪水量推定に関する研究，土木学会第27回水理講演会論文集，pp.359～364，1983.
- 13) 高橋 裕・榎本歳勝・小泉俊雄・小池俊雄：カイト気球を用いた積雪調査（第一報），土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，pp.1～2，1983.
- 14) 高橋 裕・武田 要・森園繁光・小池俊雄：LANDSAT 積雪面積情報の利用による流域積雪水量推定に関する研究，土木学会第26回水理講演会論文集，pp.171～176，1982.
- 15) Hamon, W. R. : Estimation Potential Evapotranspiration, ASCE, HY 3, paper 2817, 1961.
- 16) 土木学会編：水理公式集，pp.111～112，1975.
- 17) 高橋 裕・安藤義久・伊藤 孝・伊藤和央：山地河川の低水流の減水特性に関する研究，土木学会論文報告集，第337号，pp.75～81，1983.
- 18) 高橋 裕・小池俊雄・吉野昭一：融雪量の分布特性について，土木学会第28回水理講演会論文集，pp.447～452，1984.

(1984.9.14・受付)