

石狩川上流域の地形特性と積雪分布に関する研究

正 員 山 口 甲 *
正 員 長谷川 茂 **
正 員 近 藤 幸 雄 ***

ま え が き

積雪寒冷地である北海道の融雪期における河川流出量の予知は洪水対策、水資源として雪を考える場合にはきわめて重要な問題である。

融雪流出に関する基礎的研究は、いままで多くの人々によって行なわれてきたが、広い流域を有する河川での融雪量の予測には気温を融雪要因の重要な指標と考え、雪線を推定してDegree hour法を用いている。しかし、地形条件によって積雪深が異なるため画一的な雪線の推定では流出量の誤差が大きくなる傾向があり平面的な積雪深分布の推定が必要となつている。

本文では、石狩川上流域の伊納地点（流域面積3378.6 Km²）（図-1 参照）を対象にしその方法を検討した。地域地形を2.0Km×2.0Kmのメッシュ化を行ない地形解析をして積雪深分布と密度分布から積雪相当水量分布を把握し、総包蔵水量を求めて伊納地点における河川の直接流出と検証した結果きわめて良好な精度を得た。

1 地 形 解 析

河川流域内の積雪相当水量の推定はきわめて難しい問題であるが、最近、地形解析を行ない積雪深に影響のあると思われる地形因子に基づいて多重相関回帰方程式によってその積雪深を推定しようとする方式が開発されてきた。

石原、丸安、田浦らが用いている地形因子は、高度、起伏度、日本海からの距離、谷方向傾斜、谷密度、開放度走向、主要尾根からの距離、最高点の方向、地形の波植生、凹凸度など多くの因子を用いている。これらの地形因子には独立的な因子と相互に従属的な因子があるが本文では、表-1に示した12ケの地形因子を取り出すこととした。すなわち地形図から容易に求められる高度、起伏度、傾斜、凹凸度、地面傾斜などである。

地形因子の読み取りには、流域を一定の間隔でメッシュ化する必要があり、メッシュの格子点について地形因子を表-1に示した定義に従って読み取ればよいわけで

あるが、このうち凹凸度半径と地面傾斜についての計算方法を説明する。

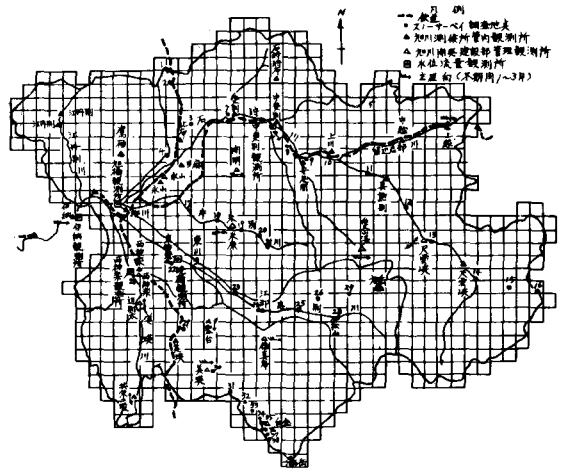


図-1 流域図

表-1 地形因子

記号	因子名	定 義 (単位)	値を数値とする地形図のスケール
P_2	高 度	地点の標高 (m)	1 / 5 万
P_4	起伏度 (半径2 km以内)	地点を中心とした半径2 km以内の最高点の標高と地点の標高との差 (m)	1 / 5 万
P_5	起伏度 (半径5 km以内)	地点を中心とした半径5 km以内の最高点の標高と地点の標高との差 (m)	1 / 5 万
P_6	起伏度 (半径10 km以内)	地点を中心とした半径10 km以内の最高点の標高と地点の標高との差 (m)	1 / 20 万
P_7	傾 斜 (S - N)	地点の南1 km点の標高と、北1 km点の標高との差 (m)	1 / 5 万
P_8	傾 斜 (E - W)	地点の東1 km点の標高と、西1 km点の標高との差 (m)	1 / 5 万
P_9	凹凸度半径 (S - N)	地点の南1 km点の標高、地点の標高および地点の北1 km点の3点を結んだ三角形の外接円の半径 (m)	1 / 5 万
P_{10}	凹凸度半径 (E - W)	地点の東1 km点の標高、地点の標高および地点の西1 km点の3点を結んだ三角形の外接円の半径 (m)	1 / 5 万
P_{11}	地 面 傾 斜 $\nabla(H - \bar{H})$	③式より求める。	1 / 5 万
P_{12}	地 面 傾 斜 $\nabla(\bar{H} - \bar{H})$		
P_{13}	地 面 傾 斜 $\nabla(\bar{H} - \bar{H})$		
P_{14}	地 面 傾 斜 $\nabla \bar{H}$		

* 北海道開発局土木試験所河川研究室 室長

** 全 上 主任研究員

*** 全 上 研究員

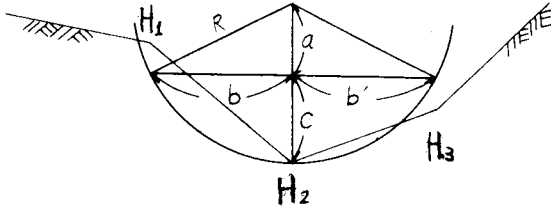


図-2 凹凸度半径のモデル

図-2 に示した地形凹凸度半径 R は(1)式で計算する。

$$R = -\frac{1}{2C} (C^2 + b^2) \dots\dots\dots (1)$$

ここに

$$C = \frac{1}{2} (H_1 + H_3) - H_2$$

b : 距離 (m), H_1, H_2, H_3 : 標高(m)
メツシユ格子点より $b = 1000$ m 地点の標高を代入し、 R が (+) 符号の場合は凸地形、(-) 符号の場合は凹地形とするため(1)式に (-) を付けてある。

次に地面傾斜は次のようにして求める。 H をメツシユ格子点の標高とすれば(2)式が成立する。

$$\bar{H} = (H - \bar{H}) + (\bar{H} - \bar{\bar{H}}) + (\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}}) + \bar{\bar{\bar{H}}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに

$\bar{H}$ はメツシユ間隔 D だけ離れた周囲の 4 交点における H の平均値

$\bar{\bar{H}}$ は、同様にして $2D$ の H の平均値

$\bar{\bar{\bar{H}}}$ は、同様にして $4D$ の H の平均値

D を流域の地形で卓越している波長のうち最小のもの、のうちの $1/4$ の長さにとれば、(2)式の右辺の第 1 項は波長 $4D$ の地形、第 2 項は $8D$ の地形、第 3 項は $16D$ の地形、第 4 項は $4D, 8D, 16D$ の波長の地形で長波長の地形とみなすことができる。

次にこれらの地形の波の地面傾斜は主風向によつて異なり、主風向が W 方向の場合で図-3 に示した座標を例にとれば(3)式から求めることができる。

$$\Delta (H - \bar{H})_{X,Y} = [(H - \bar{H})]_{X,Y} - (H - \bar{H})_{X,Y-1} / D$$

$$\Delta (\bar{H} - \bar{\bar{H}})_{X,Y} = [(\bar{H} - \bar{\bar{H}})_{X,Y} - (\bar{H} - \bar{\bar{H}})_{X,Y-1}] / D$$

$$\Delta (\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}})_{X,Y} = [(\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}})_{X,Y} - (\bar{\bar{H}} - \bar{\bar{\bar{H}}})_{X,Y-1}] / D \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta \bar{\bar{\bar{H}}}_{X,Y} = (\bar{\bar{\bar{H}}}_{X,Y} - \bar{\bar{\bar{H}}}_{X,Y-1}) / D$$

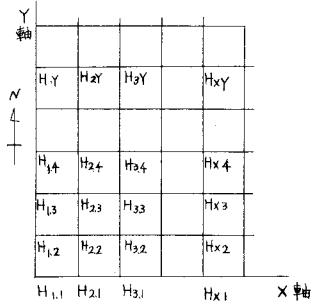


図-3 地面傾斜のモデル

ここに

D : メツシユ間隔

$X = 1, 2, \dots\dots\dots n$

$Y = 1, 2, \dots\dots\dots m$

$$\bar{H}_{X,Y} = \frac{2}{4} (H_{X+1,Y} + H_{X-1,Y} + H_{X,Y+1} + H_{X,Y-1})$$

$$\bar{\bar{H}}_{X,Y} = \frac{1}{4} (\bar{H}_{X+2,Y} + \bar{H}_{X-2,Y} + \bar{H}_{X,Y+2} + \bar{H}_{X,Y-2})$$

$$\bar{\bar{\bar{H}}}_{X,Y} = \frac{1}{4} (\bar{\bar{H}}_{X+4,Y} + \bar{\bar{H}}_{X-4,Y} + \bar{\bar{H}}_{X,Y+4} + \bar{\bar{H}}_{X,Y-4})$$

同様に N, S, E 方向についても求められる。

この流域の主風向は、降雪期間のうち 1 月～3 月までの風向ひん度分布を調べ、このうち風向ひん度の最も大きな風向を図-1 に矢印で記入した。図から NW, W 方向のひん度が多く日本海からの季節風の影響をうけていることがよく説明できる。そこで主風向は W 方向と決めて(3)式を計算したが、部分的に地形の影響をうけて主風向と異なる場所もある。

2 積雪相当量

広い流域を有する河川で積雪による総包蔵水量の推定は平面的に数多くの地点で積雪相当水量の調査をしなければ精度の向上が計れない。現在までの調査では融雪期前における最大積雪深と思われる時期にスノーサーベイを実施し積雪深と雪の平均密度を測定して積雪相当水量を求め、流域面積を乗じて積雪期における流域の総包蔵水量としている。しかし、スノーサーベイは多くの労力と冬期間における調査の危険性がともなうところから調

査地点の選定、調査個数には自ずから限界が生じる。
 そこで最近では航空写真測量とスノーサーベ이를併行して
 実測し、航空写真から多くの地点で求められた積雪深と
 スノーサーベいで実測された平均密度から積雪相当水量
 を求める傾向にある。また、航空写真から判読抽出した
 融雪流出解析を行なっている。

流域内の包蔵水量の推定は上述の方法で計算されるが
 各年によつて気象条件が異なるため積雪深分布に変化が
 あつて毎年同様な調査が繰り返されているのが現状であ
 る。

しかし、毎年気象条件に変化があつて積雪深が異なつ
 ても地勢あるいは地形は固定的であり、降雪が地形の影
 響をうけて分布するため、積雪の深浅分布は毎年同様の
 割合で変化するものと考えて差支えないと思われる。従
 つて実測された積雪分布と流域の地形特性の関係を把握
 することが重要となる。

特に融雪流出量の推算を行なう場合には、上流域内の
 平面的な積雪相当水量の分布を精度よく推定する必要が
 ある。

(1) 積雪深の推定方程式

メツシュの格子点における積雪深の推定値を地形因子
 から推定する方程式を次式とする。

$$H_s = A_0 + A_1 X + A_2 Y + A_3 X^2 + A_4 Y^2 + A_5 XY + A_6 P_3 + A_7 P_4 + A_8 P_5 \cdots \cdots + A_{17} P_{14} \cdots \cdots (4)$$

ここに

H_s : 積雪深 (cm)

X, Y : 座標値

$A_0, A_1, \cdots A_{17}$: 定数、係数

$P_3, P_4, \cdots P_{14}$: 地形因子

昭和43、44、45年の3ケ年間についてスノーサーベ
 調査における積雪深および観測所地点で実測した積雪深
 と実測地点の地形因子を(4)式に入れて電子計算機で重相
 関回帰方程式の定数と係数を求めたのが表-2のとおり
 である。

表-2 積雪深、密度推定のための重相関回帰方程式の定数と係数

推定年月日	A_0 a_0	A_1 a_1	A_2 a_2	A_3 a_3	A_4 a_4	A_5 a_5	A_6 a_6	A_7 a_7	A_8 a_8	A_9 a_9	A_{10} a_{10}	A_{11} a_{11}	A_{12} a_{12}	A_{13} a_{13}	A_{14} a_{14}	A_{15} a_{15}	A_{16} a_{16}	A_{17} a_{17}	A_{18} a_{18}
昭和45.3.18	積雪深 68517818	-4125706	-2745828	041536	040627	086616	031407	004010	-002144	-001256	-021383	-017976	000002	-000005	-001857	-015828	019066	100955	
	密度 629500	000963	000049	-000016	-000005	-000028	-000013	-000015	000006	-000002	-000008	000003	0	0	-000007	000039	000033	-000009	-000012
昭和44.3.24	積雪深 26244999	-1950789	-1084132	017148	022830	034655	027440	002183	-006047	009545	-011315	000564	000002	000001	004029	-007304	000328	034870	
	密度 012491	000790	001788	-000001	-000015	-000039	-000012	000004	000010	-000006	-000009	-000018	0	0	000009	000063	000027	000030	-000104
昭和43.3.	積雪深 13213001	-1008434	-481016	012401	012909	012901	016774	000539	002553	-001309	-002667	-001386	000004	000006	007737	006510	006373	061529	
	密度 022898	-000438	004346	000004	-000112	-000027	-000010	000011	000003	-000012	-000025	-000040	0	0	-000011	-000005	000092	000239	-000071

このようにして求めたものがどの程度の精度をもつか
 を重相関回帰方程式作成のために用いた実測積雪深と、
 (4)式から求めた積雪深の比較をしたものが図-4である
 また、重相関係数を示すと表-3のようになる。昭和45
 年は多小バラツキが多いが、44年、43年はかなり良好な
 精度で収束していることがわかる。

表-3 重相関係数

推定年月日	昭和45.3.18	昭和44.3.24	昭和43.3.21
重相関係数	0.863	0.942	0.942

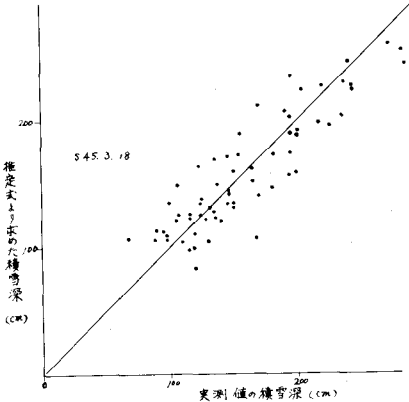


図-4 実測値と推定値の積雪深の比較図

表 - 4 積雪深、地形因子の単相関係数 (昭和45.3.18)

	X	Y	X ²	Y ²	XY	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄
X																	
Y	-0090																
X ²	0972	-0035															
Y ²	-0126	0975	-0080														
XY	0691	0623	0689	0573													
P ₃	0764	-0452	0751	-0434	0202												
P ₄	0505	-0051	0572	-0072	0402	0539											
P ₅	0582	-0270	0559	-0224	0211	0751	0772										
P ₆	0611	-0173	0570	-0184	0339	0519	0629	0592									
P ₇	-0155	-0189	-0191	-0103	-0236	0099	-0118	0155	-0174								
P ₈	-0113	-0060	-0186	-0021	-0096	0083	0032	0015	-0087	-0059							
P ₉	-0038	-0012	-0072	0036	-0036	0013	-0073	0034	-0036	0099	0045						
P ₁₀	0022	-0013	0011	-0017	0020	-0009	0004	-0078	0029	0066	-0004	0031					
P ₁₁	-0278	0313	-0278	0295	0029	-0331	-0440	-0488	-0274	-0066	-0026	-0043	-0008				
P ₁₂	0093	0014	0103	-0003	0089	0183	-0015	-0101	-0115	-0063	0210	0067	-0005	0040			
P ₁₃	0236	-0372	0170	-0303	-0123	0548	0126	0476	0034	0228	0278	0076	-0103	-0219	0078		
P ₁₄	0187	-0393	0013	-0335	-0132	0350	0344	0355	0448	0122	0396	0075	0025	-0169	-0078	0304	
積雪深	0272	-0318	0278	-0226	-0038	0600	0308	0552	0343	0093	0182	0072	-0084	-0192	0071	0374	0356

次に積雪深と12ヶの地形因子の単相関係数を求めたもののうち昭和45年3月18日について示したものが表-4である。表から積雪深に対する相関係数は高度P₃が最も大きく次いで起伏度P₄、P₅、P₆などにはかなり相関性があり、起伏度半径5Kmが大きな値を示している。また、地面傾斜P₁₁、P₁₂、P₁₃、P₁₄のうち16Dの波長の地形あるいは長波長の地形が相関係数が高く4D、8Dの波長の地形は小さい値となつてゐる。傾斜P₇、P₈は、E-W傾斜の方がS-N傾斜より相関性が高い。これは主風向がW方向なのでその影響によるものでないかと推測される。凹凸度半径P₉、P₁₀はあまり相関性が認められない。

次に(4)式を用いて流域におけるメツシユ格子点の積雪深(cm)を求めたものを図-5に示した。図は昭和45年3月18日の積雪分布であるが、平地より山地の方が積雪深が大きい値となつてゐる。

(5)式は、(4)式にa₁₈Hsの項を加えたものである。また、0.1≦ ρ ≦0.6の条件は図-6より平均密度の実測値から上限と下限の範囲を限定したものである。

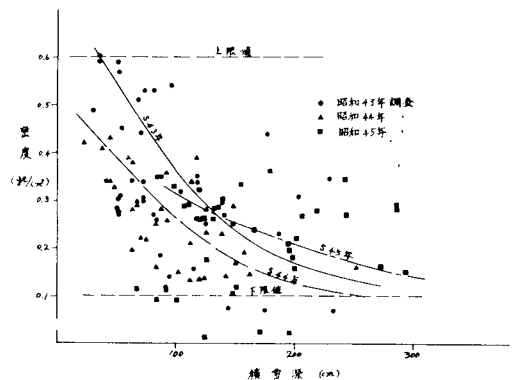


図-6 密度と積雪深の相関図



図-5 積雪深分布図

(2) 平均密度の推定方程式

積雪の平均密度の推定方程式は、積雪深の推定方程式(4式と同様に考えて(5)式の形におくものとする。

$$H_p = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 X^2 + a_4 Y^2 + a_5 XY + a_6 P_3 + a_7 P_4 + \dots + a_{17} P_{14} + a_{18} H_s \dots \dots (6)$$

$$0.1 \leq H_p \leq 0.6$$

ここに

H_p : 平均密度 (gr/cm^3)

$a_0, a_1, \dots, a_{18}$: 定数、係数

平均密度の測定はスノーサーベイによる実測値だけでは個数が少ない。そこで、精度の向上を計るため、スノーサーベイによる積雪深と平均密度の相関図より、観測所の積雪深から平均密度を求める。これを(5)式に代入して重相関回帰方程式の定数と係数を求めたものが表-2である。

このようにして求めたものがどの程度の精度をもっているかを実測平均密度と(5)式から求めた平均密度の比較したものが図-7である。積雪深に比較してバラツキが多くなっているが、実測時における測定誤差と観測所の推定誤差によるものと推定されるが、それでもかなりの精度で収束している。

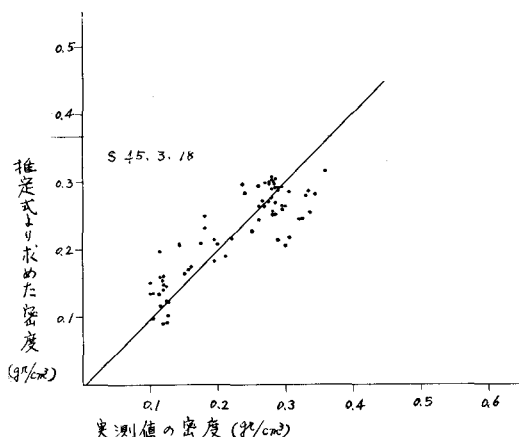


図-7 実測値と推定値の密度の比較図

(3) 包蔵水量の推定

流域における総包蔵水量 V の推定は(7)式によつて求められる。

$$V = \sum \frac{1}{4} \{ (H_s, H_p) X \cdot Y + (H_s, H_p) X_{+1} \cdot Y + (H_s,$$

$$H_p) X \cdot Y_{+1} + (H_s, H_p) X_{+1} \cdot Y_{+1} \} a X \cdot Y \dots \dots (7)$$

a : 1 メツシュの面積

(7)式はメツシュの4格子点の積雪相当水量の平均値に4格子点に囲まれた面積を乗じることを意味している。(7)式で昭和45、44、43年の3ケ年について総包蔵水量を求めたものが表-5である。45年は44年、43年に比較して小さく見積られているようである。これは図-6よりスノーサーベイの実測平均密度が0.1以下の測定値もあるためと思われる。

表-5 総包蔵水量

	3月1日~6月30日まで ①伊納流量観測所 における直接流出量	②総包蔵水量	スノーサーベイ調査後 ③6月30日までの 総降水量	流出率 ④ $\frac{①}{③+②}$
昭和 45.3.18	1.7610×10^6 m^3	1.2670×10^6 m^3	6453×10^6 m^3	0.92
昭和 44.3.24	1.1536×10^6 m^3	907.6×10^6	8210×10^6 m^3	0.67
昭和 43.3.21	$1.119.7 \times 10^6$ m^3	971.4×10^6	577.7×10^6 m^3	0.72

[注] 降水量は旭川測候所のみとして計算する。

ま と め

流域内の地形因子を読みとり多重相関回帰方程式より深積深、平均密度を求め積雪相当水量を計算し、流域の総包蔵水量を推定することを検討したがきわめて良好な結果を得た。また、著者らは推定した積雪相当水量分布図に基づいて立神単位図法を応用して融雪流出量の推算を試みる研究を行なっている段階であるが次回に発表する予定である。

最後に旭川開発建設部治水課から多くの資料の提供を受け、プログラム開発には東京芝浦電気株式会社、原田実雄氏が協力して下さいましたこと、また、本文は北海道開発庁試験研究費および文部省特定研究(1)の研究費による共同研究であり併せて感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1 安隆和、内田正人、田浦秀春、航空写真による融雪ならびに流出解析、1964、4月、土木学会論文報告集第164号、別刷
- 2 原田健二、水文気象の話(XⅢ)水温の研究第12巻第1号 1968、5月