

II-26

流雪溝における限界投雪量について

北海道開発コンサルタント(株)	正 員	渡辺 洋一
北海道開発コンサルタント(株)	正 員	山根 正裕
北海道開発コンサルタント(株)	正 員	澤口 雄介
北海道開発コンサルタント(株)	正 員	原田 希樹

1. はじめに

流雪溝における限界投雪量とは、ある一定流量の流水の作用によって流雪溝内において閉塞や停滞をおこさず流下させることができる最大の雪量とすることができる。

近年、積雪寒冷地においては流雪溝の計画あるいは施工がさかんに行われているが、それらの事業において限界投雪量を知ることは計画の基本となるものである。さらに最近では投雪作業の委託化などにより、投雪パターンの変化や機械投雪などに対する適応性の検討が要求される事例も発生している。

現在、流雪溝における限界投雪量の算定には投雪実験に基づいた実験式が多く用いられているが、それらは算定値にばらつきがあることや理論的裏付けが無い事等により信頼性に課題を残している。又、現在提案されている理論解についても、多くは雪塊と壁面との摩擦抵抗に基づく力学的なつり合いを求めたものや雪混り流れを粘性流動としてとらえたものであるが、いずれについても現象を完全に再現できるモデルは確立されていない。

本研究では、以上の問題点を踏まえた上で流雪溝における雪塊の流れを、水で飽和した雪層流れ部とその下層のせん断力を持った流水のみの部分とに分け、雪塊と壁面の摩擦抵抗と流水によるせん断力との力のつり合いを基本とする理論モデルによって限界投雪量の算定を行った。さらに投雪量と水深及び流速との関係を確認し、加えて倶知安町及び下川町における投雪実験結果と比較検討を行った。

2. 基本モデルと考え方

(1)モデルの概要

このモデルは水で飽和した雪塊の部分(領域Ⅰ)と流水のみが存在する部分(領域Ⅱ)とに雪混り流れを区分したものであり、領域Ⅰの雪層部分が壁面から受ける抵抗と領域Ⅰと領域Ⅱの相対速度($v_2 - v_1$)によるせん断力がつり合うことによって等流状態が持続されることを基本とするものである。すなわち、ある一定量の流水量 Q_w に対して一定量の投雪量 Q_s が投雪された場合、雪塊が流水の作用

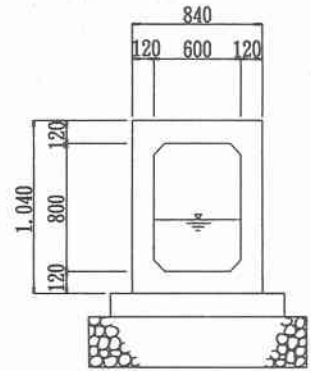


図-1 流雪溝断面図(例)

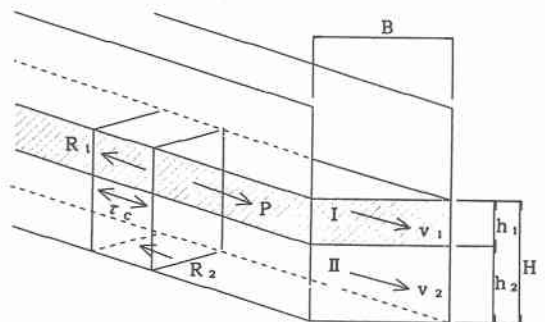


図-2 基本モデル

によって流下していくためには流れは以下に示す(1)式が成り立っている必要がある。

$$P + \tau_c \cdot B \cdot \varrho = R_1 + R_2 \quad (1)$$

上式において各変数は

- P : 雪塊に作用する重力による力 (kgf)
- τ_c : 領域Ⅰが領域Ⅱとの相対速度によって受けるせん断力 (kgf/m²)
- R₁ : 領域Ⅰが側壁から受ける摩擦力 (kgf)
- R₂ : 領域Ⅰが底面から受ける摩擦力 (kgf)
- B : 水路幅 (m)
- ϱ : 流れ方向の単位長さ (1m)

のように表され、ここではさらに個々の力の特性について述べる。

(2) 雪塊に作用する重力による力 (P)

図-3に示すように単位長さ ϱ 当りの雪混り流れの部分に働く重力をMとすれば、 $M \cos \theta$ は浮力Fとつり合っていると考えられ、流れ方向には $P = M \sin \theta$ が作用する。

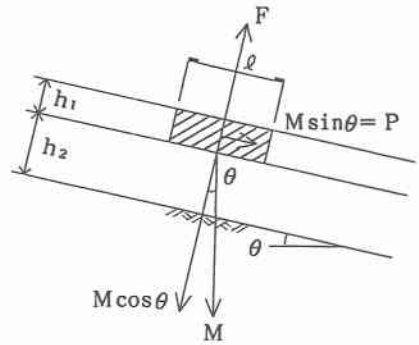


図-3 雪塊に働く重量の作用

(3) 雪層に作用するせん断力 (τ_c)

通常十分に発達した乱流では、せん断力は流速の2乗に比例するとされており²⁾、次のように表される。

$$\tau_c = \pm \rho_w \frac{n^2}{R^{1/2}} (v_2 - v_1)^2 \quad (2)$$

- n : 粗度係数
- R : 径 深 (m)
- ρ_w : 水の密度 (kgf/m³)
- v_1 : 雪層部の流速 (m/s)
- v_2 : 雪層下部の流れの流速 (m/s)

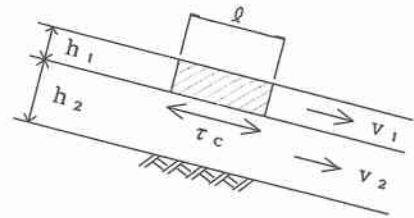


図-4 雪層に作用するせん断応力

従って雪層が下層の流れから受けるせん断力 τ_c は v_1 と v_2 の速度差の2乗に比例し、正と負の値を取り得る。

(4) 側壁からの摩擦抵抗 (R₁)

水で飽和した雪層の密度を ρ_{sw} (kgf/m³) とすれば、 ρ_{sw} は

$$\rho_{sw} = \rho_s + \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_i}\right) \rho_w \quad (3)$$

- ρ_s : 雪の密度 (kgf/m³)
- ρ_i : 氷の密度 (kgf/m³)

のように求められ、 $(\rho_{sw} - \rho_w)$ に相当する浮力が作用する。従って雪層の厚さを h_1 とすれば、 h_1 は

$$h_1 = \frac{Q_s}{B \cdot v_1} \quad (4)$$

与えられ雪層の側圧係数を α 、雪と側壁との動摩擦係数を μ とすれば雪層が側壁から受ける摩擦力 R₁ は

$$R_1 = \alpha \mu (\rho_{sw} - \rho_w) h_1^2 \quad (5)$$

となる。

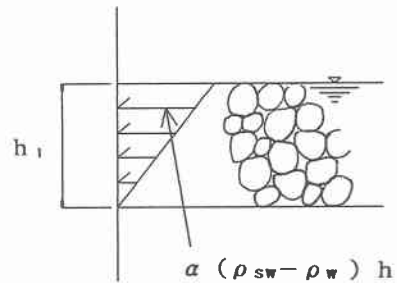


図-5 側壁からの摩擦抵抗

(5) 雪層が底面から受ける摩擦力 (R_2)

通常、浮遊して流下すると考えられる雪塊に対しては、底面からの直接的な摩擦力は考えにくい、雪塊に大小様々な粒径 D があること、流雪溝において必要最小流量の存在が指摘されていること³⁾などから、特に水深が浅い場合に雪塊への底面からの摩擦力を無視することはできないと考える。ここで、底面から雪層への摩擦力が無視できない雪層下部の水深を h_3 とすれば、雪層が底面に接地する面積比は、概ね図-6 のように推定され、 R_2 を以下の式により求めた。

$$R_2 = A \beta \mu (\rho_{sw} - \rho_w) B h_1 \dots\dots\dots (6)$$

ここで β : 鉛直方向雪圧係数

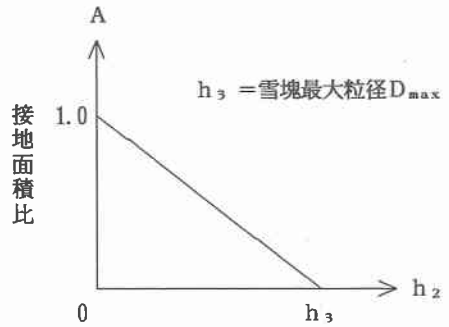


図-6 雪層の底面への接地面積比

3. 雪層流れの連続性と閉塞条件

前述のように雪塊が安定的に流下し続けるためには(1)式が成り立つことが前提となるが、同時に雪層と雪層下部について流れの連続性を確認する必要がある。流量 Q_w が与えられた場合、雪層に吸収されて領域 I を流下する流量を Q_{w1} 、雪層下部の流量を Q_{w2} とすれば、 $Q_w = Q_{w1} + Q_{w2}$ が成り立っていることが連続の条件となる。ここで、一定の流量 Q_w に対し投雪量 Q_s が少ない場合を考えると、雪塊は壁面からの抵抗をほとんど受けないため雪塊自重の流れ方向成分と雪塊下部からのせん断力との力のつり合いになる。この場合、雪塊の自重の効果は一般に小さいため、雪塊と下部流水の相対速度も小さくなり、雪塊と流水はほぼ等速度で流下する。ここで投雪量 Q_s に対し増分の ΔQ_s が加えられた場合以下のような流れの変化が考えられる。

- 雪層への壁面からの抵抗が増え、流速 v_1 が小さくなるにつれて雪層の厚さ h_1 が大きくなる。
- v_1 と v_2 の速度差が大きくなることによって雪層への流水からのせん断力が大きくなる。
- v_1 と h_1 が変化することで Q_{w1} と Q_{w2} の比率が変化する。

これらの変化がバランスして(1)式が成り立つ場合が雪層が等流状態で流下している条件と考えられる。

従って逆に水路の閉塞条件は、雪層が壁面からの抵抗によって流速 v_1 が下がり、そのことによって雪層厚が(4)式によって厚くなり、さらに抵抗が増えることによって(1)式が成り立たず発散する場合 ($h_1 \rightarrow \infty$) と考えられる。以上の考察に基づく計算フロー図を図-7 に示す。

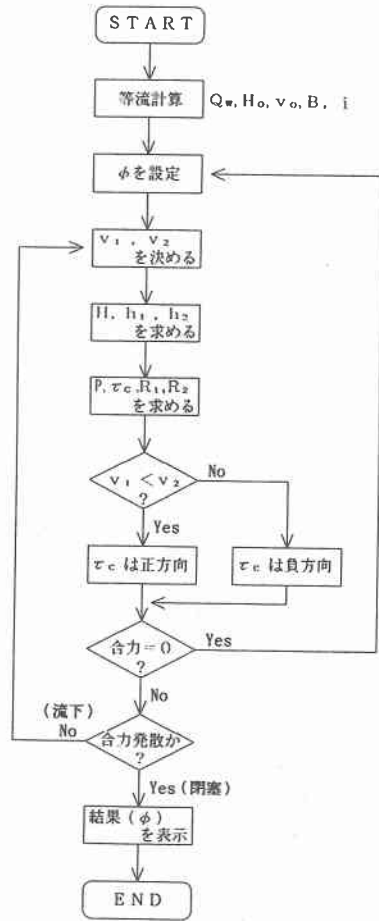


図-7 限界投雪量算定フロー図

4. 計算結果及び考察

図-8に投雪比 ϕ ($=Q_s / (Q_s + Q_w)$)と水深の関係を示す。 ϕ の増加に対して水深 H の上昇が急になっている。但し h_2 は $v_2 = v_0$ (初期流速)と仮定し、 $h_2 = Q_{w2} / (B \times v_2)$ により求めた。 H は閉塞直前において H_0 (初期水深)の約2倍になっている。

図-9は ϕ と雪層の流速 v_1 との関係である。 ϕ が大きくなるにつれて v_1 は小さな値を示すが、 v_1 が初期速度 v_0 の6割程度になった時点で閉塞が生じている。この傾向は倶知安町における実験⁴⁾によっても確認されている。

図-10に示す実線は流量 Q_w と限界投雪量 Q_{smax} の関係であるが、 Q_w が少ない範囲では底面との摩擦により Q_{smax} が小さく、 $Q_w \approx 0.1$ ㍻付近から Q_{smax} は上昇する傾向が見られる。

しかし、 Q_{smax} は $Q_w \approx 0.2$ ㍻付近で上昇の割合が極端に少なくなる。これは雪層に対する下層流水によるせん断力よりも壁面からの摩擦力が上回るため、水路の形状及び材質においての限界値とも考えられる。

以上、流れのモデル化とそれに基づく計算結果は図-10に示すように倶知安町・下川町での投雪実験結果^{4) 5)}とも良く整合し、理論の妥当性が示されたと考える。但し雪塊の閉塞は限界値を越えた場合急速に起こると考えられることから安全率を見込む必要があるかもしれない。

今後は雪塊の壁面に対する動摩擦係数や雪層下部の流速を実験によって確認し、 $Q_w - Q_{smax}$ 式に反映させるとともに湾曲部を含む流れについて研究していきたい。

(参考文献)

- 1) 時岡真治・黒木幹男・岡部和憲・板倉忠興
「流雪溝の雪氷運搬能力に関する研究」
平成5年度 土木学会北海道支部論文集
- 2) 福嶋祐介・吉永一義・早川典生・岡村康一
「流雪溝の最大流雪能力と水深増加率
に関する水理学的検討」
1991年12月 日本雪氷学会誌雪氷
- 3) 北陸建設弘済会「雪氷工学講座」
- 4) 一般国道5号倶知安町地内
「流雪溝限界投雪量調査報告書」
昭和62年3月 北海道開発局建設機械工作所
- 5) 一般国道239号
「下川町流雪溝投雪実験調査報告書」
昭和62年3月 北海道開発局旭川開発建設部

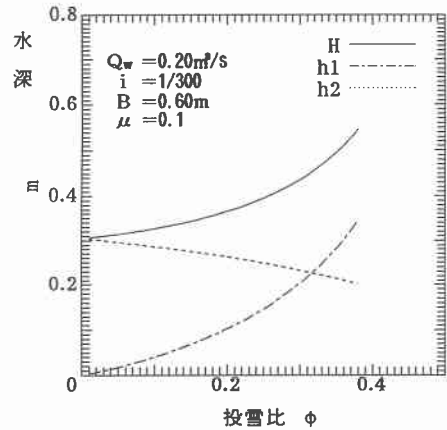


図-8 投雪比と水深の関係

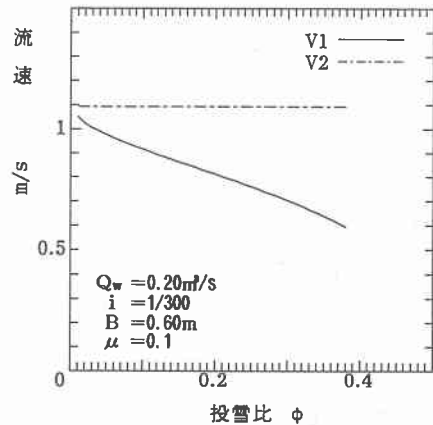


図-9 投雪比と流速の関係

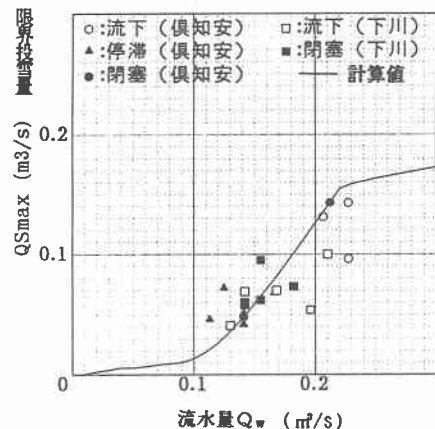


図-10 流量 Q_w と限界投雪量 Q_{smax} の関係
($\rho_s=0.37, i=1/300, B=0.60m, \mu=0.10, D_{max}=0.20m$)