

II-70

曲線部を含む流雪溝の限界投雪量について

北海道開発コンサルタント(株) 正 員 原 田 希 樹  
 北海道開発コンサルタント(株) 正 員 黒 沢 弘 行  
 北海道開発コンサルタント(株) 正 員 渡 辺 洋 一

1. はじめに

流雪溝の限界投雪量とは、ある一定量の流水の作用によって閉塞や停滞を起こさず流下させることができる最大の雪量といえることができる。いわば、流雪溝の持つ能力ともいえるべきものである。

近年、積雪寒冷地においては流雪溝の計画、あるいは施工が盛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、投雪作業の委託化や機械投雪などによる投雪パターンの変化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。

平成6年度土木学会北海道支部論文においては、流雪溝直線部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の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おけ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、倶知安町および下川町における投雪実験結果との比較検討を行い、モデルの有効性を確認した。<sup>1)</sup>

本研究では、直線部に対する理論モデルを遠心力を考慮することにより流雪溝の曲線部に拡張し、限界投雪量の算定を行った。その結果から、曲線半径が限界投雪量に及ぼす影響を推定した。

正面図

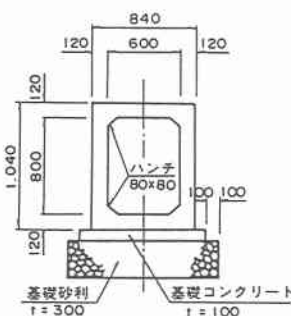


図-1 流雪溝断面図(例)

2. 基本モデルと考え方

このモデルは、流雪溝の流れを水で飽和した雪塊の部分(雪層)と、流水のみが存在する部分(水層)とに区分したものである。雪層部分に作用する自重による力、水層が雪層に与えるせん断力、ならびに雪層部分が壁面から受ける抵抗とが釣り合うことにより等流状態が持続されることを基本とする。すなわち、ある一定量 $Q_w$ の流水に対し一定量 $Q_s$ の投雪が行われた場合、雪塊が流水の作用によって安定的に流下していくためには、以下に示す(1)式が成り立っている必要がある。

$$P + \tau_c \cdot B \cdot \ell = F_s + F_B + F_R \cdot A \quad (1)$$

- P : 雪塊に作用する重力による力 (kgf)
- $\tau_c$  : 雪層が水層との相対速度によって受けるせん断力 (kgf/m<sup>2</sup>)
- $F_s$  : 雪層が側壁から受ける摩擦力 (kgf)
- $F_B$  : 雪層が底面から受ける摩擦力 (kgf)
- $F_R$  : 雪層が遠心力により側壁から受ける摩擦力 (kgf/m<sup>2</sup>)

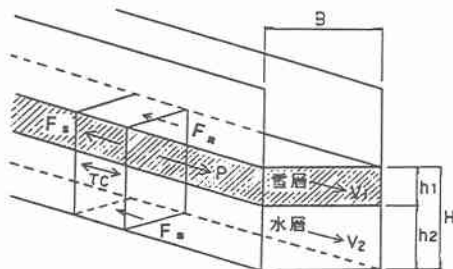


図-2 基本モデル

The Maximum Snow Conveyance Rate on the Snow Removal System with an Open Channel in a Curve  
 by Mareki HARADA, Hiroyuki KUROSAWA and Yohichi WATANABE.

B : 水路幅 (m)

$\ell$  : 流心の長さ (1 m)

A : 雪層が曲線部外側の側壁と接触する面積 (m<sup>2</sup>)

個々の力の特性については以下に述べる。

### 2-1. 雪塊に作用する重力による力 (P)

図-3に示すように、流心長さ  $\ell$  当りの雪層に作用する重力を  $M$  (kgf)、水路勾配を  $i$  とすると流れ方向には  $P = M \sin i$  が作用する。

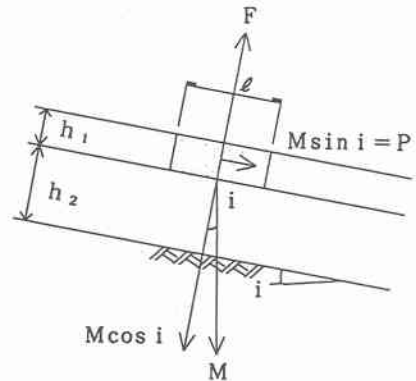


図-3 雪塊に働く重力の作用

### 2-2. 雪層に作用するせん断力 ( $\tau_c$ )

$V_1$  と  $V_2$  の大小により作用する方向が異なるため、次のように表される。

$$\tau_c = W_w \frac{n^2}{R^{1/3}} (V_2 - V_1) |V_2 - V_1|^{2/3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$n$  : 粗度係数

$R$  : 径 深 (m)

$W_w$  : 水の単位体積重量 (kgf/m<sup>3</sup>)

$V_1$  : 雪層の流速 (m/s)

$V_2$  : 水層の流速 (m/s)

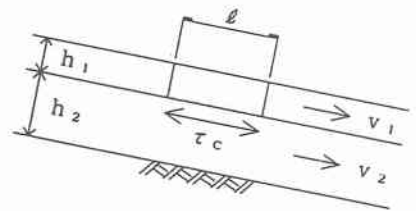


図-4 雪層に作用するせん断力

### 2-3. 側壁からの摩擦力 ( $F_s$ )

水で飽和した雪の単位体積重量を  $W_{sw}$  (kgf/m<sup>3</sup>) とすると、

$$W_{sw} = W_s + \left(1 - \frac{W_s}{W_i}\right) W_w \quad \dots\dots\dots (3)$$

$W_s$  : 雪の単位体積重量 (kgf/m<sup>3</sup>)

$W_i$  : 氷の単位体積重量 (kgf/m<sup>3</sup>)

雪層の厚さを  $h_1$  とすると、

$$h_1 = \frac{Q_s}{B \cdot V_1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

雪塊は重力とは逆の向きに浮力を受けることから、側壁に及ぼす圧力は図-5に示すような逆三角形の分布となる。雪層の側圧係数を  $\alpha$ 、雪と壁の動摩擦係数を  $\mu$  とすると、雪層が側壁から受ける摩擦力  $F_s$  は、

$$F_s = \alpha \mu (W_w - W_{sw}) h_1^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

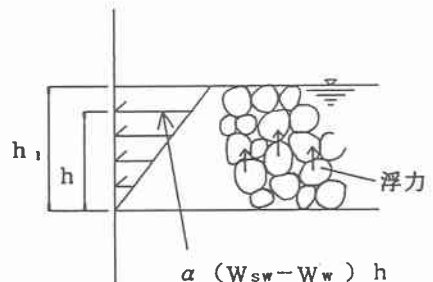


図-5 側壁からの摩擦抵抗

### 2-4. 雪層が底面から受ける摩擦力 ( $F_b$ )

特に水深が浅い場合において、雪塊への底面からの摩擦力が無視できないと考え、次式で表現した。

$$F_B = \beta \mu \left(1 - \frac{h_2}{D_{max}}\right) (W_w - W_{sw}) B h_1 \quad \dots (6)$$

$\beta$  : 鉛直方向雪圧係数  
 $D_{max}$  : 雪塊最大粒径  
 (但し  $h_2 \geq D_{max}$  の時  $F_B = 0$ )

つまり、水層の水深  $h_2$  が  $D_{max}$  以下の場合に底面からの摩擦力が作用し、 $h_2 = 0$  で最大値となる。

### 2-5. 遠心力による側壁からの摩擦力 ( $F_R$ )

図-6 に示すように、曲線部における雪塊の微小部分に作用する遠心力を  $F$  (kgf) とすると、

$$F = B \cdot h_1 \cdot d\theta \cdot W_{sw} \cdot (V_1 \cos i)^2 \quad \dots (7)$$

$\theta$  : 回転角 (rad)

遠心力  $F$  により、曲線部外側の側壁から雪塊に作用する摩擦力  $F_R$  (kgf/m<sup>2</sup>) は以下のように表される。

$$F_R = \frac{\mu \cdot F}{h_1 \left(r + \frac{B}{2}\right) d\theta} \quad \dots (8)$$

$r$  : 曲線半径 (m)

### 3. 流れの連続性と閉塞条件

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、同時に雪層と水層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、雪層に吸収されて流下する流量は、

$$Q_{w1} = B h_1 \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_l}\right) V_1 \quad \dots (9)$$

と表すことができ、水層の流量を  $Q_{w2}$  とすると、 $Q_w = Q_{w1} + Q_{w2}$  が成り立つことが連続の条件となる。

逆に、水路の閉塞条件は、

- ① 雪層が壁面から受ける抵抗により流速  $V_1$  が低下する
- ② ①により雪層厚  $h_1$  が(4)式に従って増加する
- ③ ②により更に抵抗が増加する

となり、①～③を繰り返すことで(1)式が成立しなくなり、発散 ( $h_1 \rightarrow \infty$ ) する場合と考えられる。

以上の考え方に基づく計算フローを図-7 に示す。

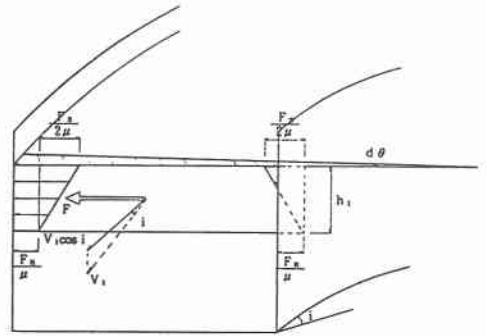


図-6 遠心力による側壁からの抵抗

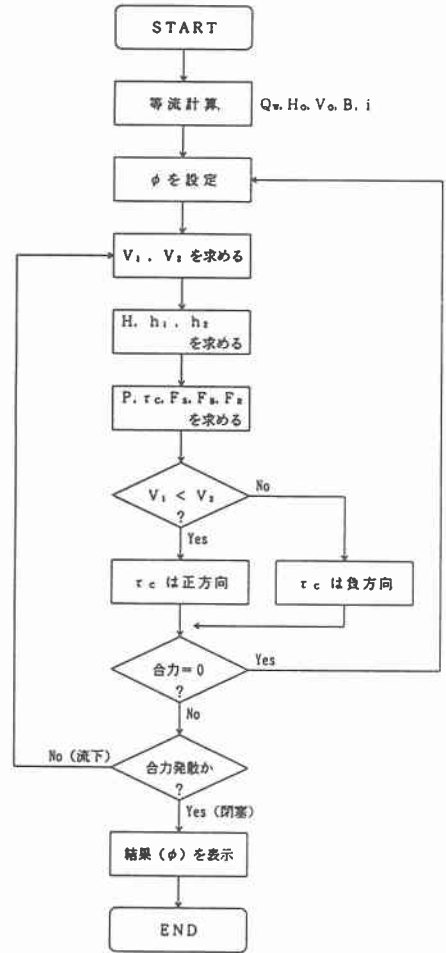


図-7 限界投雪量算定フロー

#### 4. 結果および考察

図-7の計算フローをプログラム化し、計算を行った結果を図-8以降に示した。

図-8は曲線半径  $r$  (m) と限界投雪量の関係である。同一条件の場合、 $r=5$  (m) 以上の範囲で限界投雪量は直線部と近い値を示しているが、それ以下になると急速に低下し、 $r=1$  (m) では直線部の6割程度の値を示している。<sup>4)</sup>

図-9は、同一条件で曲線半径  $r$  (m) を変化させ、流量  $Q_w$  (m<sup>3</sup>/s) と限界投雪量  $Q_s$  (m<sup>3</sup>/s) の関係を求めたものである。 $Q_w=0.2$  (m<sup>3</sup>/s) 付近までは  $r$  による変化はそれほど顕著には現れないが、それ以降は  $r$  の小さいものから順次上昇割合が少なくなる。これは、雪層に対する下層流水によるせん断力よりも遠心力による壁面からの摩擦力が上回るため、水路の形状および材質における投雪量の限界値とも考えられる。但し、流雪溝の閉塞は限界値を越えた場合に急速に起こると考えられることから、実際の設計においては安全率を見込む必要があると思われる。

なお、実際の流雪溝では曲線半径が同一でも、回転角が大きくなるほど曲線部の延長が長くなることから、曲がりによる損失が大きくなり閉塞する確率は高くなると考えられる。

今後は、流雪溝曲線部に関する実験データを収集・整理し、モデルの整合性について確認するとともに、当モデルに回転角の要素を取り入れることを検討したい。

曲線半径と限界投雪量の関係

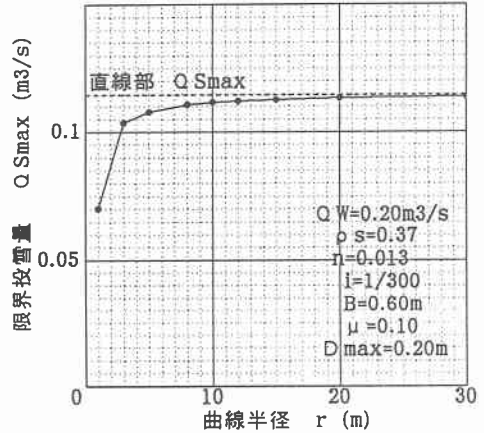


図-8 曲線半径と限界投雪量の関係

流量と限界投雪量の関係

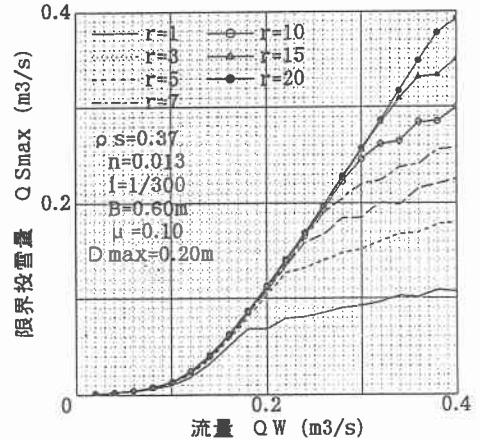


図-9 流量と限界投雪量の関係

#### 《参考文献》

- 1) 渡辺洋一、山根正裕、澤口雄介、原田希樹  
「流雪溝における限界投雪量について」平成6年度 土木学会北海道支部論文集
- 2) 時岡真治、黒木幹夫、岡部和憲、板倉忠興  
「流雪溝の雪水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
- 3) 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』
- 4) 「積雪寒冷地における流雪溝マニュアル(案)」平成2年2月 (財)北海道開発技術センター
- 5) 北陸建設弘済会「雪氷工学講座」