

II-2 雪混じり流れの構造と運搬能

北海道大学工学部 時 岡 真 治

北海道大学工学部 正 員 黒 木 幹 男

北海道大学工学部 正 員 板 倉 忠 興

1. はじめに

近年流雪溝の付設が進んでいる。流雪溝を用いると、街区の中から直接雪を排出する事ができ、車両による運搬を省略できるメリットがある。流雪溝の設計における第一条件は、溢水を起こさないことである。溢水とは、輸送可能な流雪量を超え、投雪が行われ水路が閉塞する事により生じる。そのためには、輸送可能である最大流雪量を知ることが重要である。最大流雪量を求める式には、経験式をはじめ、水理学的条件⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾や力学的条件⁽⁴⁾から導かれた諸式がある。しかし、輸送能を表す式が実用的でない場合や、誘導過程が曖昧な場合もある。今回、雪層底面は水平とし、誘導することにした。水路は広矩形とし側壁面の影響は考慮していない。

2. 輸送能を表す一般式

雪層底面でせん断力は、ある値 τ_c を持ち、雪層内では水深方向に流速一定とする。

雪層底面以下のせん断力分布を次式で与える。

$$\tau - \tau_c = \rho_w \varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1)$$

ただし、 τ :任意位置のせん断力 τ_c :雪層底面でのせん断力

u :流速 z :河床からの距離 ρ_w :水の密度

ε :渦動粘性係数で水深方向に一定とする。

せん断力に次式のような直線分布を仮定する。

$$\tau_c = \frac{h - l_c}{h} \tau_0$$

ただし、 τ_0 :河床せん断力 l_c :河床から雪層底面までの距離 h :水深

(1)に(2)を代入し整理すると、次式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u}{u_*} \right) = \frac{1}{\varepsilon_*} (-\tau_c^* + \tau_0^* (1 - \eta)) + \frac{u_b}{u_*} \quad (3)$$

ただし、 $\eta = h/z$, $\tau_c^* = \tau_c / \rho u_*^2$, $\tau_0^* = \tau_0 / \rho u_*^2$, $\varepsilon_* = \varepsilon / u_* h$, u_* :摩擦速度

また $u_b / u_* = 1 + 1/\kappa \log(h/k_s)$ κ :カルマン定数 k_s :相対粗度

河床から雪層底面まで積分し整理すると次式のようになる。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{\tau_0^*}{\varepsilon_*} \left\{ \eta_c \eta - \frac{1}{2} \eta^2 \right\} + \frac{u_b}{u_*} \eta \quad (4)$$

ただし、 $\eta_c = l_c/h$

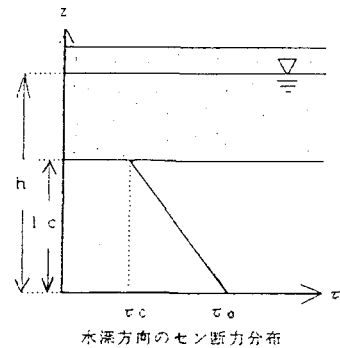


Fig. 1. (2)

水の無次元単位幅流量を求める

(4)式を0から η_c まで積分し雪層底面以下の無次元単位幅流量を求める。

$$\frac{q_w}{h u_*} = \frac{\tau_0^*}{\varepsilon_*} \frac{\eta_c^3}{3} + \frac{u_b}{u_*} \eta_c \quad (5)$$

ただし、 q_w :水の単位幅流量

雪塊部の無次元流速は、(4)式より以下のようにになる。

$$\frac{u_c}{u_*} = \frac{\tau_0^*}{\varepsilon_*} \frac{\eta_c^3}{2} + \frac{u_b}{u_*}$$

雪塊部の水の単位幅流量は、(5)式に水深の比である $(h-l_c)/h$ および、空隙の割合を示す $(1-c)$ を乗じることにより以下のようにになる。

$$\frac{q_w}{h u_*} = (1-c)(1-\eta_c) \left\{ \frac{\tau_0^*}{\varepsilon_*} \frac{\eta_c^2}{2} + \frac{u_b}{u_*} \right\} \quad (6)$$

ただし、 c : 固相率と呼ばれる雪の単位体積当たりの体積

(5)(6)式より水の水面以下の単位幅流量は以下のようにになる。

$$\frac{q_w}{h u_*} = \frac{\tau_0^*}{\varepsilon_*} \frac{\eta_c^3}{3} + \frac{u_b}{u_*} \eta_c + (1-\eta_c)(1-c) \left\{ \frac{\tau_0^*}{\varepsilon_*} \frac{\eta_c^2}{2} + \frac{u_b}{u_*} \right\} \quad (7)$$

雪の無次元単位幅流量を求める。

雪層の厚さは、雪層に働く重力 $w = \rho_s g h_s$ と浮力 $F = c \rho_w g (h-l_c)$ が釣合ことから、 $h_s = c \rho_s / \rho_w (h-l_c)$ となる。

ただし、 h_s :雪層の厚さ、 ρ_s :空隙を含む雪の密度

よって、(5)式に水深の比 h_s/h および 固相率 c を乗じることにより、雪の単位幅輸送量は、次式で表すことができる。

$$\frac{q_s}{h u_*} = c^2 \frac{\rho_w}{\rho_s} (1-\eta_c) \left\{ \frac{\tau_0^*}{\varepsilon_*} \frac{\eta_c^3}{2} + \frac{u_b}{u_*} \right\} \quad (8)$$

ただし、 q_s :雪の単位幅輸送量

(8)式により、雪層と水路底面の間の距離の無次元量 η_c を、与えれば最大輸送能を知ることができる。

$h/k_s = 10, 100, 1000$ の場合を右図に示す。

$c=0.5, \sigma=0.3, \varepsilon_* = 1/15$ とした。

ただし、 $\sigma = \rho_s / \rho_w$

グラフより、雪の無次元輸送量 q_s^* は、 η_c

が増加すれば、単調に減少し、水の無次元流量 q_w^* は、単調に増加する。

$\eta_c=0$ の場合とは、雪層の底面と水路の底面が一致するときであり、 $\eta_c=1$ の場合とは、雪層の底面が水面と一致するときであり、すなわち雪がないときである。

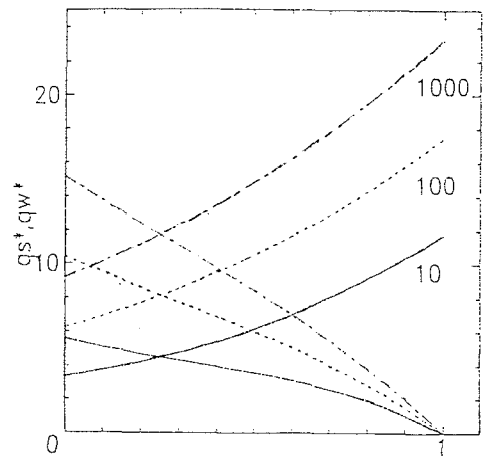


Fig. 2.

q_s^* と q_w^* の交点は、両方の流量が一致する場合であり最適な状態を示す。

$\eta_s=0$ のとき雪の最大輸送能を示す。

3. 最適な状態

グラフより無次元流量 q_w^* と q_s^* との交点が最適な状態となる。

マニング式と粗面の対数式を比較すると以下の関係がある。

$$\frac{u_m}{u_*} = 7.66 \left(\frac{h}{k_s} \right)^{\frac{1}{6}} = \frac{h^{\frac{1}{6}}}{n \sqrt{g}}$$

上記の関係を用いて、最適な状態をマニングの粗度係数 $n=0.010, 0.020$ とした場合を右図に示す。

$c=0.5, \sigma=0.3, \varepsilon_s=1/15$ とした。

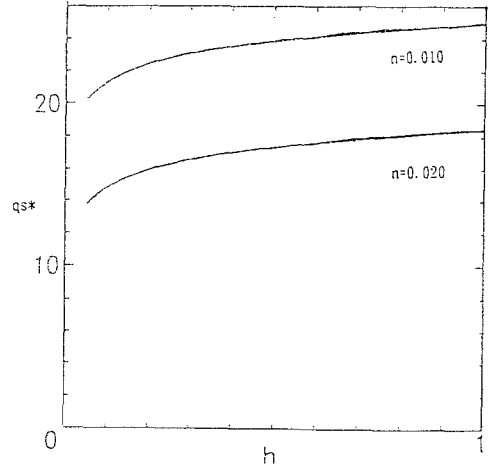


Fig 3.

4. 最大輸送能

雪の最大輸送量は $\eta_s=0$ のときとなる。すなわち、雪層底面が水路底面まで達したときに最大値を得る。

$\eta_s=0$ として(7)(8)式を表す。

$$\frac{q_w}{h u_*} = (1-c) \frac{u_b}{u_*} \quad (9)$$

$$\frac{q_s}{h u_*} = c^2 \frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{u_b}{u_*} \quad (10)$$

(9)(10)式を見ると、 q_w/hu_* と q_s/hu_* の比は、固相率と比重の比である c, σ にのみ依存することがわかる。固相率 c と雪の最大輸送量の関係を示す。

$\sigma=0.3, \varepsilon_s=1/15, n=0.020$ とし、 $c=0.3, 0.4, 0.5$ の場合を示す。

次に、密度の比 σ と雪の最大輸送量の関係を示す。

$c=0.5, \varepsilon_s=1/15, n=0.020$ とし、 $\sigma=0.3, 0.5, 0.7$ の場合を示す。

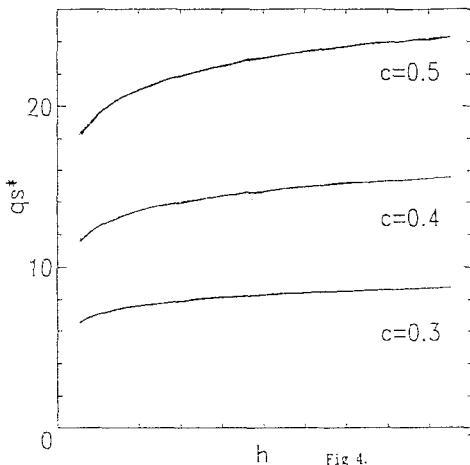


Fig 4.

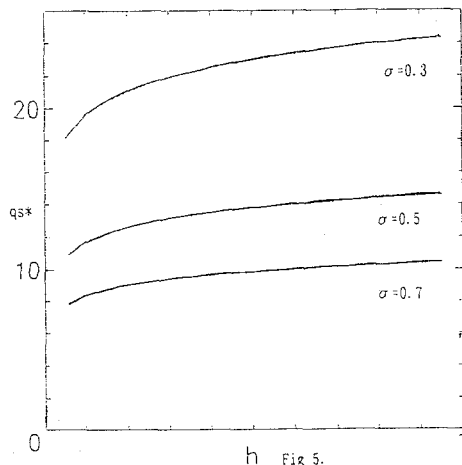


Fig 5.

(9)(10)式より q_s, q_w の比をとると、以下ようになる。

$$\frac{q_s}{q_w} = \frac{c^2}{1-c} \frac{\rho_w}{\rho_s} = \frac{c^2}{1-c} \frac{1}{\sigma} \quad (12)$$

c, σ と(12)式の流量比との関係をグラフに表す。

通常、 $\sigma=0.3, c=0.5$ 程度であり、流量比は1.67となる。

グラフを見て分かるように c, σ の値に大きく依存する。しかし、通常、流雪溝に投入される雪では $C=0.5$ 以下である。また c の値が大きくなると σ の値も大きくなるので、 c, σ は互いに効果を打ち消す関係にある。

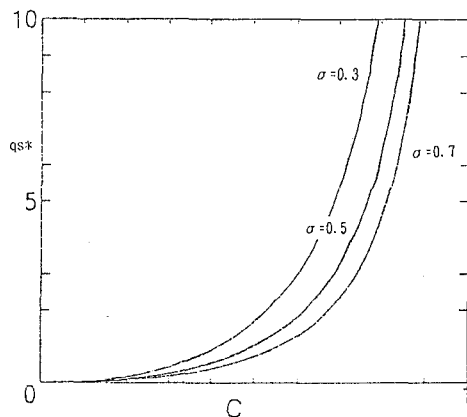


Fig 6.

5 終わりに

(12)式を用いることにより雪の性質が分かれば、流量を決め、限界の投雪量を知ることができる。また、逆に、あらかじめ投雪量が分かるときには、閉塞しない必要流量が分かる。

雪の最大流量は、(8)式より雪層底面が水路底面と一致したときである。このことは、雪塊が水路全面を占めた状態を表しており当然の帰結と言える。しかし、実際には、雪塊が水路底面に達すると、水路底面と雪塊の間に摩擦力が働く。したがって今回のモデルでは、水路底面と雪塊の間に微小な距離を認めることにする。

本研究では、雪層内の流速を一定とし誘導したが、この点を確認する必要がある。また、 c, σ の相関関係を表現する必要もある。また、実際の水路に適用するために側壁面の影響を考慮した式に改めたい。

4. 参考文献

- (1) 佐々木 幹 夫、西 田 修 三 流雪溝の設計流量について 第29回水理講演会論文集 1985. 2 pp191
- (2) 黒 木 幹 男、岡 部 和 憲 河川の雪氷輸送能評価の可能性の検討
- (3) 佐 藤 敏 之、首 藤 伸 夫 雪混じり流水の抵抗法則 第27回水理講演会論文集 1983. 2 pp801
- (4) 岡 村 康 一、福 嶋 祐 介、早 川 典 生、村 上 正 人 流雪溝の雪輸送能力に関する水理学的検討 水工学論文集 第36巻 1992. 2 pp287