

II-60

流雪溝の雪氷運搬能力に関する研究

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 開発局 正 員 岡 部 和 憲
 北海道大学工学部 正 員 板 倉 忠 興

1. はじめに

近年流雪溝の設置が進んでいる。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、水理学的条件や力学的条件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。また、現在用いられている評価式においても、小千谷市で行われた実験に基づく式と、新潟鉄道管理局の資料では運搬能に4倍の違いがあり、確立されていない状況にある。

今回、雪層の代わりに発泡スチロールを用いた実験を行う事により、雪層下部流れの構造を解明し、流雪溝の運搬能に関する評価式を求める事を試みた。

2. 雪層停滞時における流速分布

流速分布において、水路底面の支配領域をⅠ、雪層底面の支配領域をⅡとし、 y_1, y_2 をfig 1 のようにとる。

等流状態を仮定する事により、流れの運動方程式は、(1)式のようなになる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\rho \varepsilon} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

u :主流速 x :流下方向 y :水深方向 ρ :水の密度 ε :渦動粘性係数 渦動粘性係数は、以下のように与えた。

$$\varepsilon_1 = \frac{6}{K} u \cdot h_1 : \varepsilon_2 = \frac{6}{K} u \cdot h_2$$

せん断力分布式は、(2)式によって表される。

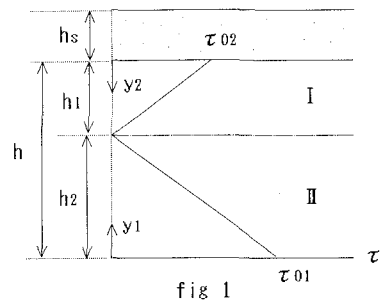
$$\tau_1 = \rho \varepsilon_1 \frac{\partial u_1}{\partial y_1} : \tau_2 = \rho \varepsilon_2 \frac{\partial u_2}{\partial y_2} \quad (2)$$

せん断力は、水路底面で τ_{01} 、雪層底面で τ_{02} の値を取り、 $y_1 = h_1$ で $\tau_{01} = \tau_{02} = 0$ とするとせん断力は、(3)式で表される。

$$\tau_1 = \tau_{01} \left(1 - \frac{y_1}{h_1} \right) : \tau_2 = \tau_{02} \left(1 - \frac{y_2}{h_2} \right) \quad (3)$$

広矩形と仮定して、底面せん断力および、摩擦速度を以下のように表す。

$$\tau_{01} = \rho g h_1 i : u_{*1} = \sqrt{g h_1 i} : \tau_{02} = \rho g h_2 i : u_{*2} = \sqrt{g h_2 i}$$



また、底面及び雪層底面での流速、 u_{b1}, u_{b2} は、次式で表される。

$$\frac{u_{b1}}{u_{*1}} = c_1 + \frac{1}{\kappa} \log \frac{h_1}{k_1} \quad : \quad \frac{u_{b2}}{u_{*2}} = c_2 + \frac{1}{\kappa} \log \frac{h_2}{k_2} \quad (4)$$

c_1, c_2 は定数

雪層流下速度 0 のときの流速分布式は、(1), (2), (3)式及び (4)式より(5)式で表す事ができる。

$$\frac{u_1}{u_{*1}} = \frac{\tau_{01}}{\rho \varepsilon_1 u_{*1}} \left(y_1 - \frac{y_1^2}{2h_1} \right) + \frac{u_{b1}}{u_{*1}} \quad : \quad \frac{u_2}{u_{*2}} = \frac{\tau_{02}}{\rho \varepsilon_2 u_{*2}} \left(y_2 - \frac{y_2^2}{2h_2} \right) + \frac{u_{b2}}{u_{*2}} \quad (5)$$

(5)式と測定値の比較

水路勾配 1/270，水路幅 30cm の底面スチール、側面ガラスの水路を用いて、連結した発泡スチロール板を、水路上流端において半固定し、レーザー流速計により流速を測定した。

相当粗度 k は、マンニングの粗度係数を用いて、以下のように表される。

$$k = (7.66 n \sqrt{g})^6$$

粗度係数は、開水路における対数則と測定流速を比較し求めた。その結果、水路底面の粗度係数 $n_1=0.010$ 、発泡スチロールの粗度係数 $n_2=0.015$ の値となった。

Fig. 2に実測値と(5)式の値を示す。 $c_1=c_2=9.5$ とした。

(4)式と測定値の比較

Fig. 2 に示されたように、水路底面付近で実測値との差が大きいが、比較的良い近似を得た。

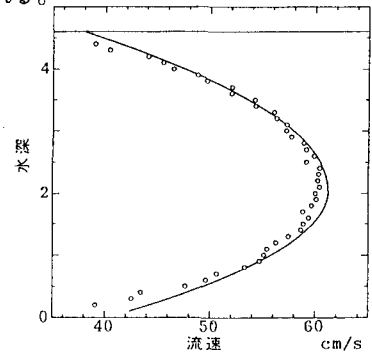


fig 2

3. 雪層流下時における流速分布式

雪層流下速度 v_s を(6)式のように表す。

$$\frac{u_1}{u_{*1}} = \frac{\tau_1}{\rho \varepsilon_1 u_{*1}} \left(y_1 - \frac{y_1^2}{2h_1} \right) + \frac{u_{b1}}{u_{*1}} \quad : \quad \frac{u_2}{u_{*2}} = \frac{\tau_2}{\rho \varepsilon_2 u_{*2}} \left(y_2 - \frac{y_2^2}{2h_2} \right) + \frac{u_{b2}}{u_{*2}} + \frac{v_s}{u_{*2}} \quad (6)$$

(6)式と測定値の比較

前記と同様な条件の水路を用いて、幅25cm、厚さ 3.5 cm、長さ91cm、密度0.011g/cm³の発泡スチロール板を、連続的に水面に投入し、流速分布を測定した。スチロール板に側壁面との抵抗を与えるために、fig 3 のように水路下流部においてガイドを設け、スチロール板の流速を調節した。

また、ガイドを設けなければ、スチロール板と壁面が付着してしまい測定が困難となった。

Fig. 4に実測値と(6)式の計算値を示す。

$c_1=6.5, c_2=4$ を用いた。

発泡スチロールの流下速度は、41.5cm/s であった。

発泡スチロールを一枚ずつ人手により投入する方法を取ったため、正確な流速の測定ができなかった。しかし、概ね良い近似であると思われる。

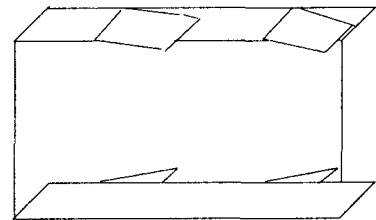


FIG 3

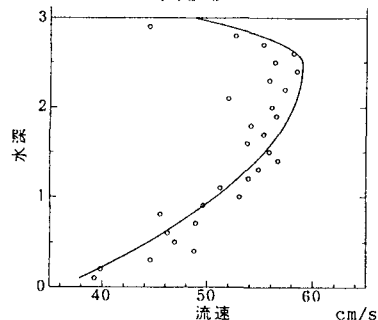


fig 4

4. 流雪溝の運搬能に関する基本式

雪層の運動方程式は、Fig. 5に示した応力の釣合状態にあるので、(7)式で表せる。

$$\rho_s g i h_s b + \tau_s b = 2 h_s \tau_w$$

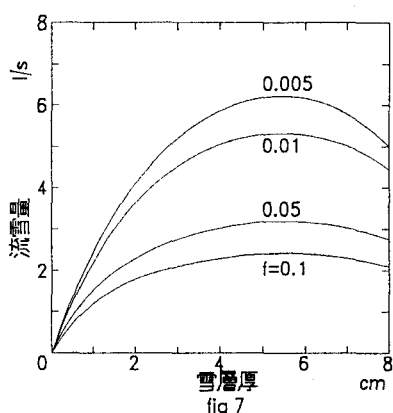
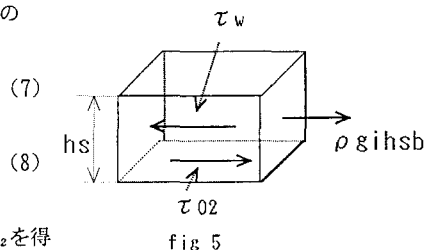
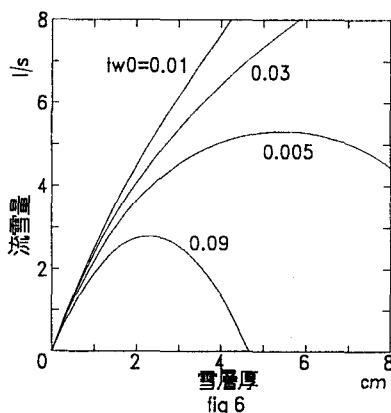
壁面でのせん断力 τ_w を(8)式で表す。

$$\tau_w = \tau_{w0} + \rho f v_s^2$$

τ_{w0} : 壁面せん断力, f : 定数

f, τ_{w0} を与え、(6)、(7)式を連立させ解く事により、 v_s, h_1, h_2 を得る事ができる。従って、流量 $QS = h_s v_s$ は、 f, τ_{w0}, h_s を定めれば求めることができる。

Fig. 6 は、 $f=0.01$ とし τ_{w0} に対応する QS を示した。Fig. 7 は、 $\tau_{w0}=0.05$ とし f に対応する QS を示した。水深10cm, 水路粗度0.010, 雪面粗度0.015, 幅30cm, 勾配1/270, $c_1=6, c_2=5$ とした。



f が0に近づくにつれ QS の値は増加し、 τ_{w0} が0に近づくにつれても QS の値は増加する。 f, τ_{w0} 共に側壁面の摩擦を表すので、 f, τ_{w0} が小さいほど流量は増加する。

5. 運搬能に関する評価式

f と τ_{w0} との大きさを比較すると、 h_s が水深と比較し小さな場合を除き、 $\rho f v_s^2$ は τ_{w0} に比して無視できるほどの大きさである。およそ、5%未満。

(8)式において、 $\tau_w = \tau_{w0}$ とし、運搬能を表す評価式を導いてゆく。

流雪溝の閉塞状況に近い状態において、雪層は側壁面に繰り返し接触する。その作用による摩擦によって、運動エネルギーのロスが生じ、力学的釣合により等流状態が維持される。極めて閉塞状態に近い状態においては、側壁面との摩擦力は、雪層の破壊せん断応力とみなせるとし、評価式を導く事にする。

運動方程式は、(9)式のようになる。

$$\rho_s g h_s b i + \tau_s b = 2 h_s \tau_c \quad (9)$$

τ_c : 破壊せん断応力 fig 8 参照

(7)式、(9)式より雪層の流下速度は、(10)式で表せる。

$$\frac{v_s}{u_{*1}} = \frac{\tau_{01}}{\rho \varepsilon_1 u_{*1}} \frac{h_1}{2} + \frac{u_{b1}}{u_{*1}} - \frac{\tau_{02}}{\rho \varepsilon_2 u_{*1}} \frac{h_2}{2} - \frac{u_{b2}}{u_{*1}} \quad (10)$$

運搬能及び流量は、以上より、(9)式により表せる。

$$Qs = h_s v_s b$$

$$Qw = \int_0^{h_1} u_1 b dy_1 + \int_0^{h_2} u_2 b dy_2 \quad (11)$$

雪層底面までの水深を一定とした場合の流量と流雪量の関係を Fig. 9 に示す。図を見て明らかなように、雪層厚が増加すると側壁面抵抗が増加し、流雪量が低下する。よって流雪量には極値が存在し、その値が限界運搬能となる。

Fig. 10 に τ_{w0} に関する限界運搬能を示した。

共に、 $N_1=0.010$, $N_2=0.015$, $l=1/270$, $B=30\text{cm}$ の値を用いた。

Table 1

雪 質	密 度	せん断強度
濡れ雪	0.08~0.30	~50
締めり雪	0.10~0.55	~100
粗目雪	0.25~0.55	30~400
氷雪	200 ~	300~

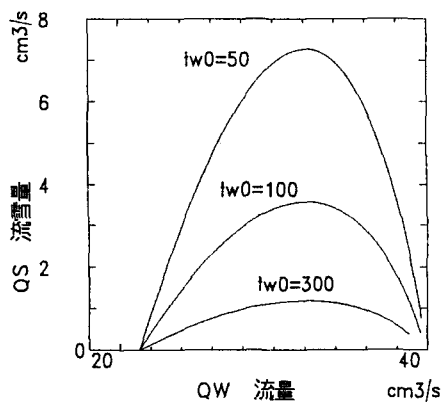


Fig. 9

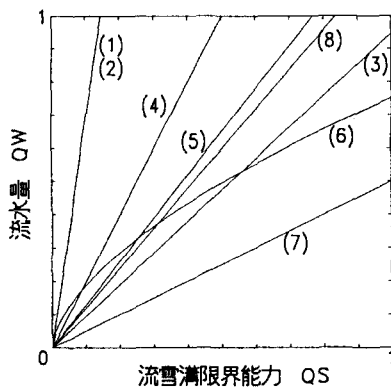


Fig. 10

(1): $\tau_{w0}=200\text{g/cm}^2$, $b=60\text{cm}$, (2): $\tau_{w0}=100$, $b=30$, (3): $\tau_{w0}=100$, $b=60$, (4): 鉄道 流雪溝設計資料, (5): 道路構造令, (6): 流雪溝設計運営要領, (7): 小千谷市の流雪溝の観測結果, (8): $\tau_{w0}=100$, $b=60$, $n_2=0.010$

6. 結語

Fig. 10 によれば、投雪量の値は、 τ_{w0} と b の値によって大きく変化する。

現在用いられている諸式と比較すると、 τ_{w0} はおよそ 100g/cm^2 であると予想できる。この値は、fig 8 に示した雪のせん断強度より小さな値となっている。実際の流雪溝では、 τ_{w0} が、 τ_c に達する以前に定常状態に移ったと考えられる。このときの τ_{w0} を求めることが重要である。

運搬能に関する τ_{w0} の影響は Fig. 10 に示したが、水路幅 b にも大きく依存する。水路幅が増加すると、雪層の底面摩擦による流下力が増大し、運搬能は増加する。したがって、アスペクト比が大きいほど有利な断面となる。(11)式を用いることにより、適当な τ_{w0} の値を用いてその水路幅 b に対応する運搬能を求めることが可能となった。

7. 参考文献

日本建設機械協会;防雪工学ハンドブック, 流雪溝マニュアル(案);流雪溝マニュアル編集委員会