

II-27

河川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
 北海道大学工学部 正員 板倉忠興
 北海道 開発局 正員 岡部和憲

1. はじめに

近年、公共事業予算において、生活者関連の予算が増加する傾向にある。これは、道路をはじめとする産業的社会的基盤の基本整備が整い、より豊かな生活環境の実現のため、ハードからソフトへ、また、都市型社会の形成へと、土木事業の質的変化が求められている結果といえる。具体的な例として、北海道をはじめとする積雪地帯においては、冬季における生活の向上という身近な問題が存在する。近年、タイヤのスタッドレス化により、除雪回数が増加し、それに伴う排雪量も増大している。

排雪手段においては、融雪施設、雪捨て場への車両による輸送、流雪溝による河川への排雪がある。流雪溝を用いると、除雪した後の排雪を、街区の中から直接排除できるメリットがある。

流雪溝の設計における重要な点は、投入可能な最大の雪の量を知る事である。最大流雪量を求める式は、実験による経験式を始め様々考案されているが、未だ確立されていない状況にある。

今回、主流部の流速分布と雪層の流下速度が相互に及ぼす影響を考慮することにより、水面に雪層が流れている状態の流れの構造を解明し、さらに、流雪溝の運搬能に関する評価を行う事を試みた。

2. 基礎方程式

定常、等流状態とし主流のみ対象とすると、主流部の運動方程式は、以下のように表す事ができる。

主流方向をX軸、横断方向をy軸、垂直方向をz軸とする。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\rho_w g i}{\epsilon} \quad (1)$$

u: 主流速度、 ρ_w : 水の密度、 ϵ : 渦動粘性係数、i: x方向の水路勾配(等流なので水面勾配に一致する)

渦動粘性係数に関しては、様々考えられるが、Rattaray⁽¹⁾らによると、開水路等流水路中央部の流れにおいては、次式の表現が最適とされている。

$$\epsilon = \kappa u_* z (1 - z/h) \quad ; z/h \leq 0.2 \quad \epsilon = \kappa u_* h / 6.24 \quad ; z/h > 0.2$$

κ : カルマン定数、h: 雪層底面から河床までの距離、 u_* : 摩擦速度

上式では、水路側岸近傍を除いた領域では、高精度の流速分布解が得られるが、側岸の影響を考慮する場合、直接適用することができない。

また、Rattarayの式では、河床付近で渦動粘性係数は小さな値をとり、 $z/h > 0.2$ の範囲は一定値を取ることになる。雪層が流れている場合は雪層の流速によって、雪層下部付近で渦動粘性係数が小さくなる事が予想される。したがって、以下のような渦動粘性係数を2タイプ仮定し実測値と比較することにした。

タイプ1 Rattarayと同様に河床付近のみ渦動粘性係数を変化させる場合

$$\epsilon_0 = \alpha \kappa u_* (h/2) / 6.24 \quad ; z/h > 0.2 \quad \epsilon = \epsilon_0 / 0.2 \times (z/h) \quad ; z/h \leq 0.2 \quad \alpha: \text{定数}$$

タイプ2 河床付近と雪層底面付近で変化させる場合

$$\epsilon = \epsilon_0 / 0.2 \times (z/h - 1) \quad ; z/h > 0.8 \quad z/h \leq 0.8 \text{はタイプ1と同様}$$

Study of Ability for Conveyance for River

by Shinji Tokioka, Mikio Kuroki, Tadaaki Itakura, Kazunori Okabe

タイプ1とタイプ2を比較するために、(1)式を差分を用いて繰り返し計算で解いた流速分布と流速の実測値を、右図に示した。実線をタイプ1による計算値、破線をタイプ2による計算値、○を実測値として表した。

実験の諸条件は、 $i=0.0037$:水路粗度 $n=0.015$:発泡スチロールの粗度 $n=0.022$:発泡スチロールの密度 $\rho_h=11\text{kg/m}^3$:水路幅 $b=0.3\text{m}$ を用いた。

計算において雪層底面の流速は、境界条件として、 $u=0.415\text{m/s}$ の値を与えた。

タイプ1とタイプ2の計算結果を比較すると、ほぼ等しい結果となっている。実測値との近似状態も良好である。

以下の計算には、タイプ2を用いる事とする。

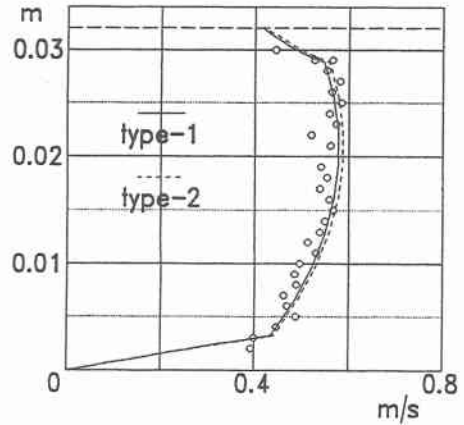


fig-1

3. 雪層部の運動方程式

雪層部の運動方程式は、等流状態における力学的釣合から以下のように表す事ができる。

$$b h_s g i (\rho_s + \beta \rho_w^2 / \rho_s) + \tau_s b = 2 h_s (\tau_{w0} + \rho f v_s^2) \quad (2)$$

ρ_s : 雪層密度、 h_s : 雪層厚、 τ_s : 雪層底面せん断力、 b : 水路幅、 τ_{w0} : 壁面せん断力、 f : 定数、 v_s : 雪層速度 また、 τ_s は、次式で表す。

$$\tau_s = \frac{1}{b} \int_0^b c_s \varepsilon \frac{u_n - v_s}{\Delta z} dy \quad (3)$$

Δz : 雪層底面から近傍の計算点までの距離、 u_n : 雪層底面から Δz 離れた点の流速、上式中の c_s は、雪層底面の粗度に関係すると思われるが、計算中では一定値 $c_s=1$ を用いた。

4. 実験値との比較

水路幅30cmの底面スチール、側面ガラスの可傾斜水路において、連結した発泡スチロール板を、水路上端において半固定した場合と、連続して水面に投入した場合の流速分布を求めた。発泡スチロールを流した場合には、スチロールの側面に水路壁面との摩擦抵抗を増やすために突起を取り付けた。

(1)、(2)、(3)式より求めた理論値と実測値の流速分布を下図に示す。

$i=0.0022$, $b=0.3\text{m}$, $h=0.045\text{m}$ 計算では、 $f=0.1$, $\tau_{w0}=0.01$, $c_s=1$ とした。

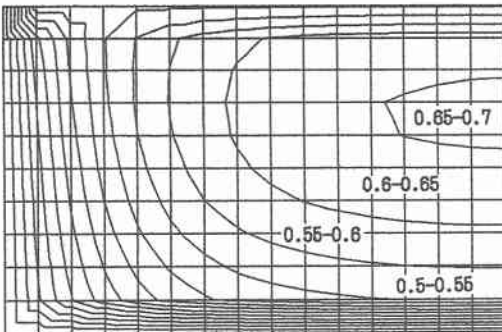


fig-2

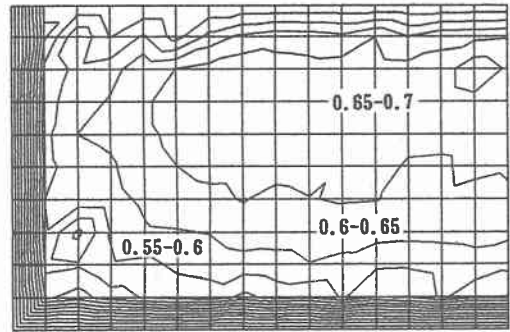


fig-3

計算値と実測値を比較すると、側壁面の影響の現れ方に大きな違いがある。実測値では、側壁面の影響範囲が比較的小さいのに対し、計算値では、側壁から水路幅の1/4 地点まで影響が顕著に現れている。

これは、渦動粘性係数が横断方向に一定値であることにより、計算値と実測値が側壁面付近で分離する。

5. 係数と雪層流下量の関係

流量と雪層流下量は以下のように表す。

$$Q_s = v_s h_s b \quad Q_w = u_m b h + \beta \frac{\rho_w}{\rho_s} h_s b v_s \quad (4)$$

β : 雪層内に水が浸透する体積の割合を表す係数。本研究中では、 $\beta=0.2$ を用いている。 ρ_s : 雪層密度
水深が一定であるとき、 f 及び τ_{w0} の値を変化させ、雪層厚 h_s と Q_w の関係を下図に示す。 $b=0.3m, i=0.025, c_s=1, h=0.05m$ とした。fig-4は、 $f=1$ として τ_{w0} を変化させた。fig-5は、 $\tau_{w0}=0.4$ として f を変化させた。

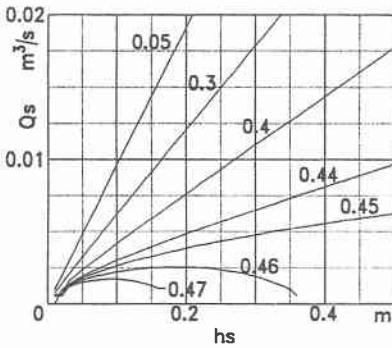


fig-4

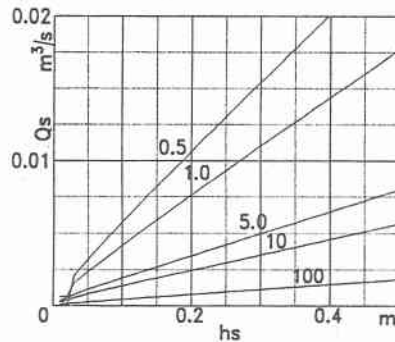


fig-5

τ_{w0} を変化させた場合と、 f を変化させた場合を比較すると、流量量への影響は f に比べ τ_{w0} の方がはるかに大きい。(2)式を変形すると次式のようになる。

$$v_s = \sqrt{\frac{1}{f} \left\{ \frac{b h_s g i (\rho_s + \beta \rho_w^2 / \rho_s) + b \tau_s}{h_s} - \tau_{w0} \right\}} \quad (5)$$

(5)式より τ_{w0} は限界値を持ち、限界値以上になると雪層厚の増加による流下力の増分以上に抵抗力が増す。その結果、流下速度が減少し、流量量が減少する。さらに投雪量を増やすと水路は閉塞する。

6. 最大流雪量

まず、雪層底面から水路底面までの距離(水深)を与える。その水深を固定し、雪層厚 h_s を増加させる。最大の流雪量を得たときの Q_w と Q_s をプロットする。水深を変化させ、繰り返す。その結果を右図に示す。

$c_s=1, i=0.025, b=0.3m, \beta=0.2$, 雪の単位体積重量を $200kg/m^3$ とした。

図中の実線は、流量に対応する最大流雪量を表すので、実線以下の量を投入する事ができる。

τ_{w0} の値が大きいときは、流量が増加することにより、雪層の流下速度が増すが、流下速度の2乗に比例して抵抗が増すので、流量の増加ほど流雪量が増加しなくなる。

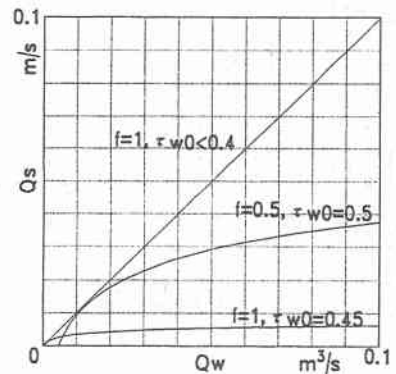


fig-6

7. 種々の評価式

現在使用されている流雪溝限界能力算定式の評価図を右図に示す。

- 凡例
- (1) 小千谷市流雪溝の実態
 - (2) $\tau_{w0} < 0.4$
 - (3) 流雪溝設計運営要項
 - (4) 道路構造令
 - (5) 国鉄
 - (6) $f = 0.5, \tau_{w0} = 0.5$

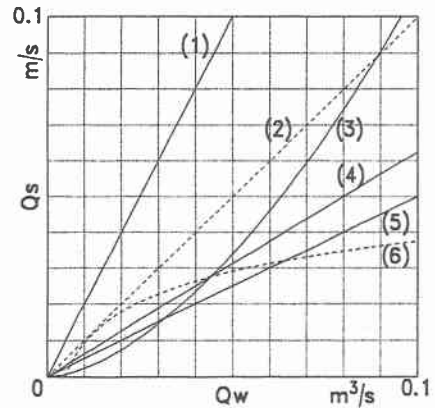


fig-7

8. 結語

fig-7 に示したように、最大流雪量は、 τ_{w0} の値が大きいとき、(6)のような対数で近似できるような曲線になる。 τ_{w0} の値が小さくなるにつれ(2)の直線に漸近していく。 τ_{w0} 、 f の値が求められれば最大流雪量が求められる。しかしながら、実際の雪について τ_{w0} や f の値を求めることは、容易ではない。今後、雪の性質や投入量に応じて τ_{w0} 、 f の値が求められるようにすることが必要である。

また、横断方向に渦動粘性係数を変化させなかったため、主流部での側壁面の影響を十分取り入れることができなかった。実際に、同一流雪量では、アスペクト比の小さな断面ほど、側壁の接触部分が大きくなり、側壁の影響が重要となる。今後は、主流部においても、側壁の影響を取り入れることが不可欠である。

9. 参考文献

- 1) Rattray, M, Jr. and Mituda E. :Theoretical analysis of conditions on a salt wedge, Estuaric and Coastal Marine Science, 2, pp. 373-394, 1974
- 2) 清水康行 北条紘次 板倉忠興:開水路における河床、河岸せん断力の算定法, 水工学論文集 第34巻, pp. 421-426, 1990
- 3) 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