

II - 49

流雪溝の基礎的研究

北海道開発局 正員 山下彰司

1.はじめに

昨冬、北海道は近年まれにみない大雪にみまわれ、特に札幌市・旭川市等の大都市では生活道路の路側に堆積した雪が恒常的な交通渋滞等の原因となり、火事などの緊急な時の防災・救急活動に大きな影響を及ぼしたりしていた。こうした中で都市域における雪対策の一つとして流雪溝がクローズアップされている。しかし、流雪溝内には投入した雪が流末の河川等に到達する前に閉塞する問題がある。流雪溝内で閉塞が生じる原因としては以下のことがあげられる。

- ① 流雪溝内の流水が雪を流末端まで流送する能力（限界投雪量）をうまること。
- ② 流雪溝内に着氷が生じて雪を流送する有効断面積の減少が原因となるもの。
- ③ 流雪溝末端の出口で河川が氷結していることにより流雪溝末端で閉塞が生じること。

②と③の原因は流雪溝を設置する場所と気象条件に関係している。①の原因のもととなる限界投雪量の算定式は今まで以下の多くの式が提案されている。ここで、 Q_w : 雪を流雪溝末端まで流送する水量(m^3/sec)、 Q_s : 流雪溝内の流水に対して流雪溝末端まで流送可能な最大の投雪量(m^3/sec)、 γ_s : 雪の比重である。

- ① $Q_w = m(1 - \gamma_s) Q_s$
 - A. 勾配の急なとき $m = 1.0$
 - B. 勾配の緩いとき $m = 1.5$
 - C. 無条件 $m = 2.0$
- ② $Q_w = 2 Q_s$
- ③ $Q_w = Q_s / 2$
- ④ $Q_w = m W_s 0.6$ W_s : 投雪量(t/sec)
- ⑤ $Q_s = m \{ Q_w (T - T_i) / (\kappa \gamma_s + (T_i - T_s) \gamma_s) + 0.3 Q_w / \gamma_s \}$

ここで、 T : 流雪溝内の水温、 T_i : 水の降下温度、 κ : 雪の融解熱、 T_s : 雪の温度、 m : 流動係数
今、流動係数を0.6とし、もし $T_i = 0$, $T_s = 0$, $\kappa = 80 cal/g$ とすると ⑤式は次式の通りとなる。

$$Q_s = m Q_w (T/80 + 0.3) / \gamma_s$$

①式は完全な経験式であり、流雪溝の勾配が1/500以上の急勾配の水路に適用される。新防雪工学ハンドブック¹⁾では係数 m は水路の状態によって $m = 1.0$ or 1.5 であり、道路構造令の解説と運用²⁾では $m = 2.0$ である。しかし、この式は雪の比重が大きいと流雪能力が大きくなる傾向がある。②式は1955年に新潟の鉄道管理局³⁾で提案されたもので緩い勾配の流雪溝を対象としている。③式は小千谷市の流雪溝での式であり、適用条件は流雪溝の勾配が急なときである。④式は国立防災技術センター新庄支所の実験から導かれた算定式⁴⁾であるが、流水量が大きくなるときには極端に大きな流雪量を与えて非現実的となる。⑤式は融雪の効果を考慮しおり土木工学ハンドブック⁵⁾で提案されている算定式である。適用範囲は勾配1/400以上が望ましいとされている。上記の限界投雪量の算定式はほとんど経験式及び実験式から導かれている。本文では室内実

Basic study on the snow flow gutter

by Shoji YAMASHITA, Hokkaido Development Bureau

験により閉塞が流雪構内で生じる機構を明らかにし、寒冷地河川における氷の輸送式を応用して流雪溝内の流水と雪の関係についての解析的検討を行い、その特徴を明らかにするものである。

2.室内実験

室内実験では開発土木研究所第4実験棟内の長さ50m幅0.3mの長水路を用いた。図-1に実験施設の概要を示す。実験では約20mの鋼製水路区間を助走区間とし、水路上の0.5mの高さからそれぞれ0.010, 0.015, 0.020 m³の雪塊を1秒間隔で投雪していく。投雪箇所より0.4m下流、8.4m下流、18.4m下流に長さ1mの測定区間を設定する。測定区間は側面に水平面に対して45度の角度で鏡を設置し、水路上から水路平面と側面を同時に

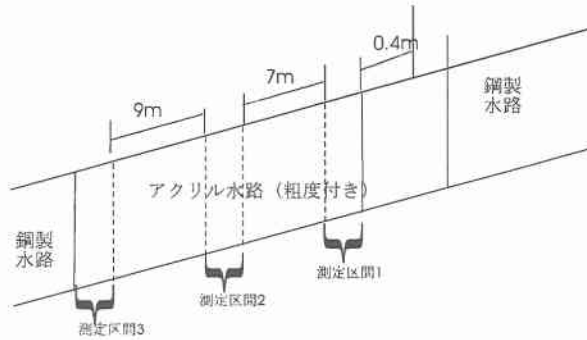


図-1 実験概要図

ビデオカメラで撮影できるようにした。また、測定区間には雪塊の動き及び水深の変化がわかるように2.5cm間隔で測線(黄色のひも)を設置した。さらに、投雪する雪塊には雪塊の流速を測定するために直径1cmの赤い玉を雪塊の上下と両側面に埋め込んでおいた。実験終了後にビデオの画像を解析して、流雪の速度・測定区間平面の全面積に占める雪塊の面積の比率・流下する雪塊の水中の厚さの変化等を整理した。水路内には鋼製の水路区間を除いて目の粗いサンドペーパーを用いて底面と側面に粗度付けを行った。測定区間は底面のみ粗度付けを行った。実験流量は0.0321m³/secであり、雪塊を投入する前の初期の水利条件は等流水深が0.16m、水路勾配が1/500であった。この水利条件では水路河床の摩擦係数 f_b は約0.0274と算定された。これはマンシングの粗度係数では0.012相当であり、新コンクリートの粗度係数に相当する。実験ケースは表-1の通りである。実験中の水温は冬期間の北海道河川の水温を想定して、ほぼ0℃に保った。

表-1 実験条件

CASE	一回の投雪量	投雪個数	備 考
CASE 3	0.020m ³ /sec	1秒間隔で連続20個投雪	投雪開始直後投雪口の downstream 1.4m で流雪塊を5秒程度塞き止めてから流下させた。
CASE 4	0.010m ³ /sec	''	''
CASE 6	0.015m ³ /sec	''	''
CASE 7	0.020m ³ /sec	''	塞き止めなし

前節の限界投雪量算定式①より投雪量0.020m³/secに対する必要流量は0.030m³/secである。また、同様に算定式⑤より流量0.0321m³/secに対する限界投雪量は0.0231m³/secである。したがって、既往の条件式では今回の実験において各ケースとも限界投雪量を超えるものはなく、閉塞は生じないと予測された。

図-2,3は実験流量 $Q_w=0.0321\text{m}^3/\text{sec}$ 、投雪量 $Q_s=0.020\text{m}^3/\text{sec}$ で行ったCASE7の実験結果を整理したものである。CASE7-1のデータは投雪口の downstream 0.4mにある測定区間1のデータである。ここでは投雪後は雪塊と水の境界面の摩擦抵抗の増加により雪塊の流速は投雪直後より減少していき、水深が上昇していく傾向がみられる。投雪口 downstream 8.4mにある測定区間2のデータ(CASE7-2)も同様の傾向を示すが、投雪終了と

なる 20 秒後には水深の上昇は止まり雪塊の流速は若干回復し定常状態となることがみられる。投雪口下流 18.4m にある測定区間 3 のデータ (CASE7-3) では投雪後水深は徐々に減少していき雪塊が通過しはじめる 25 秒前後で水深は上昇する。雪塊の流速は初期に投雪した雪塊は早いのが 30 秒を過ぎる頃から徐々に暫減していく。下流の測定区間ほど同時刻における水深が相対的に小さいのは投雪された雪が若干吸水するために真の流量が若干減少するためとおもわれる。また、雪塊の流速は CASE7-3 のデータが CASE7-1,2 より大きいのは雪塊の流れが定常状態に達したからと思われる。

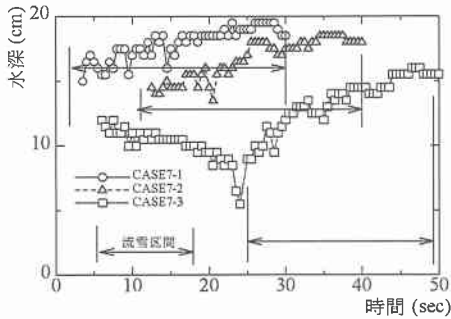


図-2 水深変化図(CASE7)

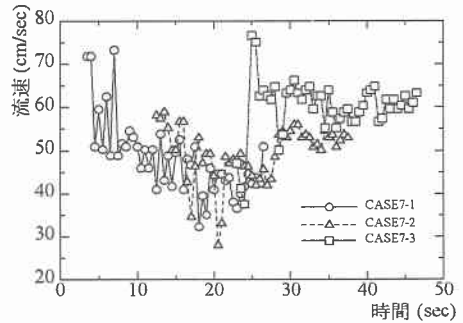


図-3 流速変化図(CASE7)

図-4 は実験流量 $Q_w = 0.0321\text{m}^3/\text{sec}$ 、投雪量 $Q_s = 0.020\text{m}^3/\text{sec}$ と同じであり、投雪口下流 1.4m で雪塊を一時的 5~6 秒間せき止めた CASE3 とせき止めなかった CASE7 の測定区間 1 における平均流水厚 (雪塊下面の水が流れている有効水深の測定区間間平均値) データの比較である。CASE3 では一時的に雪をせき止めたために 5~7 秒間で急激な水深の上昇が生じている。その後平均流水厚は CASE3 と CASE7 で同じ大きくなるが、18 秒を経過したところで CASE3 の方はまた、水深が急上昇し、一時滞留させた時と同程度の水深 ($h=0.09\text{m}$) にな

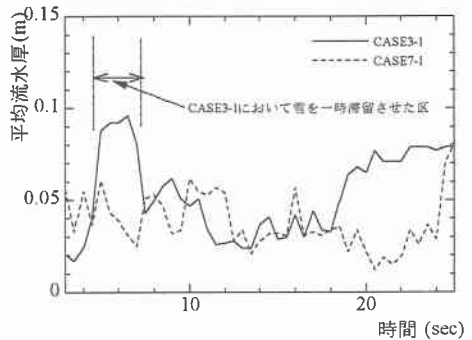


図-4 流水厚変化図($Q_s=0.020\text{m}^3/\text{sec}$)

って閉塞を起こした。CASE7 の 24 秒経過後の水位上昇は流雪が通過し終わったことから生じている。図-4 より閉塞が起きる直前では急激な水位上昇とそれに伴う流水の流速の減少があると思われる。また、CASE3 で閉塞が生じて CASE7 で閉塞が生じなかったことから、流雪溝内の水が流雪溝末端まで投雪された雪を流送することのできる限界投雪量付近では流雪溝の曲がり部や流雪溝の規模と比して大きな雪の塊によって生じる初期の微小な閉塞が最終的な閉塞を引き起こす可能性が考えられる。

3.解析

解析には H.T.SHEN ら⁹⁾の寒冷地河川における 1 次元の水の輸送式を応用して検討する。いま、流雪溝内に一定の流量と水深のある流れがある場合、その上にどのくらいの雪の層がのることができるか考える。雪塊の層の厚さの縦断方向の変化がないとすると力の釣り合いの式は以下の通りとなる。第 1 項は雪層と流雪溝側面との摩擦抵抗であり、第 2 項は流水と雪塊底面との摩擦抵抗、第 3 項は雪塊の流下方向の重力成分である。これより計算された雪の層厚 t より多い雪が流下してくれば閉塞が起り、少なければ閉塞せずに雪の層は下流に向かって動くと考えられる。

$$\frac{2\tau_B t N}{\rho_{ssat}} - \frac{\tau_w N B}{\rho_{ssat}} + t N B g \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

B : 流雪溝の幅、 τ_B :側岸セン断力、 t :雪の深さ、 ρ_{ssat} :水で飽和した雪の密度

τ_w : 雪と水の境界での抵抗、 g :重力加速度、 $\frac{\partial H}{\partial x}$: 水面勾配

また、閉塞が生じる時の投雪された雪層の側岸セン断力は以下の通りとなる。

$$\tau_B = [\tau_c + \eta \rho_{ssat} (1 - \frac{\rho_{ssat}}{\rho_w}) \frac{gt}{2}] (\frac{N}{N_{max}})^j \quad (2)$$

ここで、 N_{max} は流雪溝内を流下する雪塊の面積濃度の最大値であり、 j は任意の定数である。実験においてかなり密度の高い圧雪された雪でも吸水すると雪塊の表面は非常に柔らかくなることから粘着力は無視できると考え、 $\tau_c=0$ と置く。また、閉塞時には $N=N_{max}$ より、(2)式は次のようになる。

$$\tau_B = \eta \rho_{ssat} (1 - \frac{\rho_{ssat}}{\rho_w}) \frac{gt}{2} \quad (3)$$

流水と雪塊との境界面に働くセン断力は次のようになる。

$$\tau_w = \rho_w C_w (\frac{Q_w}{A_w})^2 \quad (4)$$

式中で $C_w = f_b / 8$ (f_b は雪の底面の摩擦係数で形状抵抗を含む。)であり、 Q_w, A_w はそれぞれ流水の流量及び流水面積である。また、水面勾配はマンニングの式を用いて次式の通りとなる。

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -I_e = -(\frac{Q_w}{A_w})^2 n_b^2 R_t^{-4/3} \quad (5)$$

式中で n_b, R_t はそれぞれ sabaneev の式から求めた水路底面側面と雪水境界面に生じる摩擦抵抗を考慮した合成マンニングの粗度係数及び全流水断面積に対する径深である。このほか(1)式を解くのに用いた係数は次の通りである。

f_b : 雪と流水の境界での摩擦係数であり、山口ら(1990)が北海道の一般河川において計測した結氷河川において frazil ice (晶氷)が存在するときの氷板下の摩擦係数の平均値0.069を用いる。

f_b : 先の実験で求めた水面に雪かきない状態での水路摩擦係数0.0274を用いる。

ρ_{ssat} : 雪密度 ρ_s の水の飽和度100%の雪の単位体積重量である。

N_{max} : 実験より得られた N の平均の最大値0.96を用いる。

η : Pareset らが結氷河川において求めた値1.28を用いる。

図-5は流水の水深を0.025m, 0.05m, 0.09m, 0.15m及び0.20mとし、閉塞が生じる限界投雪時の雪塊層と流水の断面積比を示している。水路が雪で閉塞したCASE3では閉塞時の流水厚が0.09mであったが、図より雪塊層と流水の面積比が実験流量に対して理論線上に位置していることがわかる。CASE4,6,7はCASE3より雪層-流水面積比が大きいが、流水厚が0.025mあるいは0.05mであり、理論線まで達していないことから閉塞しないことがわかる。また、同じ投雪条件であってもCASE7では流水厚が0.05mであり、投雪条件が理論線より下に位置しており閉塞しなかったのが、一時的に雪塊を滞留させたCASE3では流水厚が0.09mまで上昇し、投雪条件が理論線上に位置し閉塞がおきている。これから、限界投雪量付近では局所的な水理変化(水深の上昇)が全体的な閉塞を引き起こすことがこの検討からも推定される。

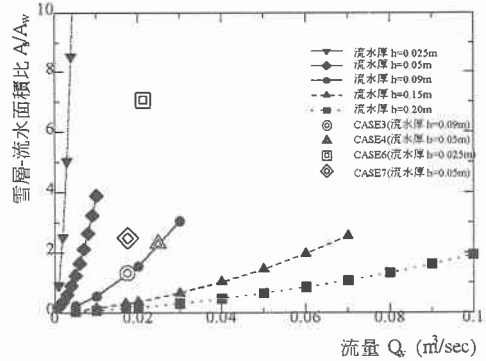


図-5 流量-面積比図 (B=0.3m)

図-6は雪の比重の違いによる限界投雪量の変化を示した図である。図より3パターンの計算水深ではすべて比重が小さく軽い雪の方が限界投雪量が大きいくことがわかる。また、計算水深が大きいくほど比重の小さい雪と大きい雪の限界投雪量の違いは小さくなる傾向がある。これは緩勾配の遅い流速の流れほど比重の違いによる限界投雪量の違いが小さくなることを示している。したがって、除雪を行うときには降ったばかりの雪の軽い時にすみやかにすることが望ましいことがわかる。

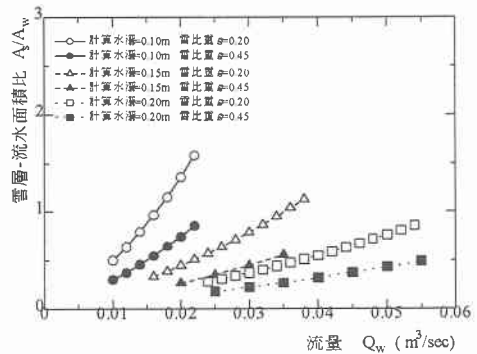


図-6 流量-面積比図(B=0.3m)

4.まとめ

- 実験より投雪後の水深の上昇に伴う流速低下により、限界投雪量が減少することが明らかになった。
- 限界投雪量付近では局所的な閉塞による水深の上昇が限界投雪量の減少を促進し、完全な閉塞を引き起こす可能性があることがわかった。
- 結氷河川における1次元の氷の輸送式を基にした力の釣り合いの式から解析的に流雪溝での限界投雪量を推定した。結果はほぼ実験値と合致していた。
- 雪の比重が小さな軽い雪の方が限界投雪量は大きくなり、また、流れの速い水路ほどその影響は顕著になることが推定される。

参考文献

- 1)日本建築機械化協会編,(1977)新防雪工学ハンドブック,森北出版
- 2)日本道路協会編,(1981)道路構造令の解説と運用,丸善
- 3)新潟鉄道管理局,(1955)雪にいとむ

- 4) 東浦将夫, (1981) 流雪溝の運用と問題点-除雪研究会資料-
- 5) 土木学会編, (1968) 土木工学ハンドブック, 技報堂
- 6) H.T.SHEN, H.SHEN and S.TSAI, (1990) *Dynamic transport of river ice*
- 7) H.YAMAGUCHI and K.HIRAYAMA, (1990) *Measurement of flow velocity under the ice cover, IAHR Ice Symposium 1990 Espoo*