

II-241 流雪溝における雪塊の運動シミュレーション

長岡技術科学大学 建設系 正会員 福嶋祐介

1. 序論

流雪溝は、有効な除排雪技術として、雪国の生活にはなくてはならないものとなっている¹⁾。これまで、流雪溝は、水路勾配をかなり大きくとることのできる地域で発達してきた。しかし、近年、比較的緩勾配のところでも流雪溝の設置が考えられている。このような条件下での流雪溝の設計を行うためには、流雪溝内の雪塊の運動を知る必要がある。本研究は、比較的緩勾配の水路を想定しそこでの雪塊の運動のシミュレーションを行ったものである。

2. 流水中の雪塊の運動シミュレーションモデル

ここではまず、開水路流中の雪塊の運動をモデル化し、基礎方程式を求める。ここで図1に示すように、開水路流中に雪塊が浮いて流れている状況を考える。モデルを求めるにあたって用いられた仮定は次のようである。(1)雪塊の形状は球とし、形状及び空隙率は運動によって変化しない。(2)底面における雪塊の衝突は不完全反射(反射率0.5)とし、底面との摩擦は考慮しない。(3)雪塊の水中部分の空隙には全て水が満たされが、空気中の空隙には水が入らないものとする。(4)水流は定常で流速分布は対数則で与えられる。以上の仮定のもとで、流下方向とこれに直交する方向の雪塊の運動方程式は次のように与えられる²⁾。

$$\rho_s \dot{V} u_s = -k V_0 \rho \dot{u}_s - c_D A_0 \rho (u_s - u) |u_s - u| / 2 + (\rho_s V - \rho V_0) g \sin \theta \quad (1)$$

$$\rho_s \dot{V} w_s = -k V_0 \rho \dot{w}_s - c_D A_1 \rho (w_s - w) |w_s - w| / 2 + (\rho_s V - \rho V_0) g \cos \theta \quad (2)$$

ここで、ドット(.)は時間微分であることを表す。また、 ρ_s 、 ρ はそれぞれ流水での雪塊の密度、水の密度である。 u_s 、 u はそれぞれ雪塊の速度、水の流速の流れ方向の成分、 w_s 、 w はそれぞれ雪塊の速度、水の流速の直交方向成分である。また、 c_D は流れが雪塊に及ぼす抗力係数、 k は付加質量係数であ

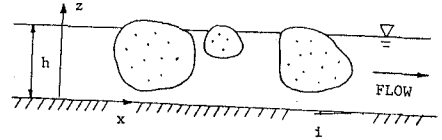


図1 開水路流中の雪塊の運動

る。 V 、 V_0 はそれぞれ、雪塊の体積、雪塊の水中部分での体積、 A_0 、 A_1 はそれぞれ、雪塊の流下方向の水中部分の投影面積、鉛直方向の投影面積である。流水中の雪塊の密度 ρ_s としては次式を用いる。

$$\rho_s V = \rho_i (1 - \lambda) V + \rho \lambda V_0 \quad (3)$$

ここで、 ρ_i は空中での雪塊の密度であり、 λ は雪塊

の空隙率である。式(1)、(2)ではBasset項は省略している。雪塊の位置 (x, z) は次式で計算される。

$$\frac{dx}{dt} = u_s \quad (4) \quad \frac{dz}{dt} = w_s \quad (5)$$

水流の流速分布は、次式の対数則で与えた。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + A_r \quad (6)$$

ここで、 κ はカルマン定数、 k_s は相当粗度、 A_r (=8.5)は定数である。また、 $u_* = \sqrt{(g i h)}$ は摩擦速度であり、 $i = \tan \theta$ は流路床勾配である。

3. 雪塊の運動シミュレーション結果

式(1)~(6)を用いて、雪塊の運動シミュレーションを行った。数値計算ではルンゲ・クッタ法を用いた。一般に流雪溝に投入される雪の大きさは様々である。そこで、雪粒子(氷)の密度を純氷の密度=0.917 g/cm³と等しいものとし、雪塊の半径を $a = 5, 10, 15$ cmと変化させた。この結果を図2~6に示す。計算で与えた諸値は以下の通りである。

$$k=0.5 \quad c_D=0.67 \quad \kappa=0.4 \quad A_s=8.5 \quad h=30 \text{ cm}$$

$$i=0.0025 \quad k_s=0.5 \text{ mm} \quad Q/B=4.18 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s} \quad (7)$$

ここで、水路の勾配 i は平坦地での流雪溝の可能性を見るためかなり小さくとっている。

初期条件は上方から雪塊を投げ込む場合を想定し、次のように与えた。

$$u_s = 0 \text{ cm/s} \quad w_s = -200 \text{ cm/s} \quad x = 0 \text{ cm} \quad z = h = 30 \text{ cm} \quad (8)$$

図2から図6まで順に雪塊の流下方向の流速、鉛直方向の流速、流下方向距離、鉛直方向の位置、水と雪塊との速度差の時間変化である。図2、4より、雪塊の速度は半径が小さい程大きいこと、図3、5より雪塊は鉛直方向には振動し、わずかに減衰しながら流下すること、また、その振動の振幅は半径が大きいほど大きいことが分かる。図6より、水流と雪塊との相対速度は雪塊の半径が大きいほど大きくなっていることがわかる。

4. 結論

流雪溝内の単一の雪塊の流れ方向とそれの直交方向の力の釣合からシミュレーションモデルを提案した。このモデルにより流雪構内での雪塊の運動を解析した。この結果、雪塊の運動は雪塊の大きさによってかなり変化することが示された。雪塊の投入後10秒程度経過すると、雪塊の運動はほぼ定常になり、水と雪塊の相対速度差はかなり小さくなることが示された。

参考文献

- 1) 高橋博、中村勉、雪氷防災、白亜書房、1986、pp. 179-193.
- 2) Graf, W. H., Hydraulics of Sediment Transport, Water Resources Publications, 1984, pp. 31-33.
- 3) 佐藤俊之、首藤伸夫、雪混じり流体の抵抗法則、第27回水理講演会論文集、1983、pp. 801-806.

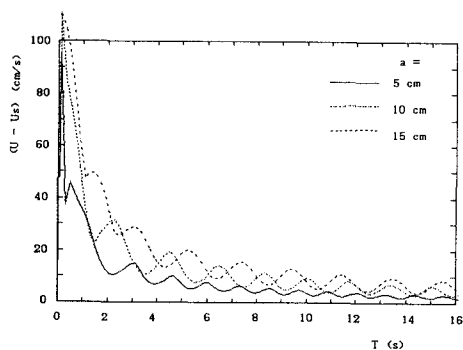


図6 水と雪塊との相対速度差の時間変化

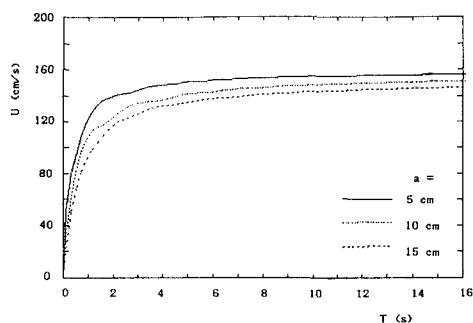


図2 雪塊の流下方向流速の時間変化

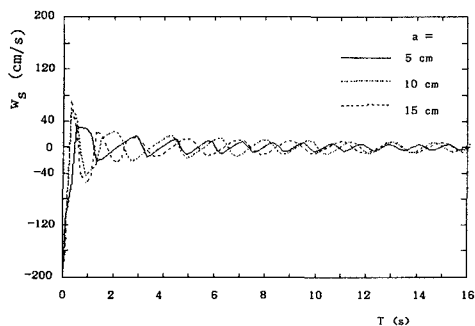


図3 雪塊の鉛直方向流速の時間変化

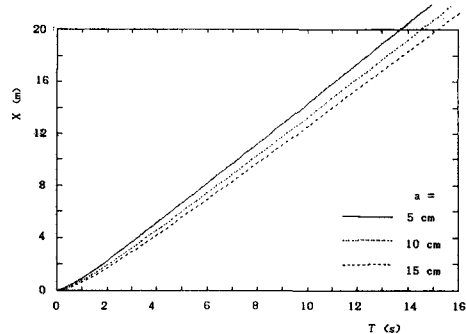


図4 流下方向距離の時間変化

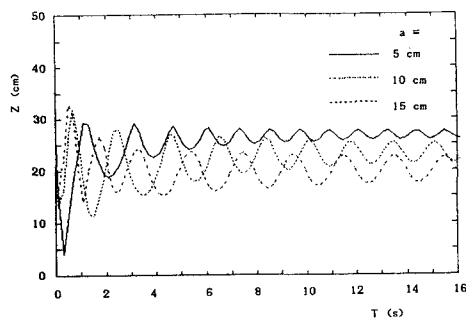


図5 鉛直方向位置の時間変化