

流雪溝の雪輸送能力に関する水理学的検討

Hydraulic Approach on the Snow Removal System

with an Open Channel

岡村康一*・福嶋祐介**・早川典生***・村上正人*

By Kouichi OKAMURA, Yusuke FUKUSHIMA, Norio HAYAKAWA and Masato MURAKAMI

Abstract

The snow removal system with an open channel is studied by the hydraulic approach. The fundamental equations are derived by adopting the two-phase flow analysis. The continuity and momentum equations are obtained for snow and water phase. Increment of shear stresses which is caused by the snow transport is taken into account in the model. The results obtained are the threshold condition of snow movement, the increment ratio of water depth and the maximum snow conveyance rate in an open channel. Some of these results are compared with the experimental data and the agreement between the theory and experimental data is quite satisfactory.

Keywords: snow removal system, threshold condition of snow movement, increment ratio of water depth.

1. はじめに

流雪溝は、近年消雪パイプ等の融雪システムと比較して、環境保護、省資源タイプの除排雪技術として見直されている¹⁾。これまで流雪溝は、新潟県十日町市、小千谷市、秋田県横手市のように、かなりの急勾配のとれる地域で普及されてきた。したがって、比較的緩勾配の地域で流雪溝を実用化するためには、開水路における雪輸送機構についてさらに検討する必要がある。これまでの流雪溝の設計は、限られた範囲内での実験結果に基づいていた。より広い水理条件のもとでの流雪溝の実用化を可能にし、溢水等の被害を防止するためには、流雪溝内の雪輸送の力学的機構を明らかにすることが必要である。本研究では、流雪溝内の雪の輸送機構を理論的に検討し、水路勾配、水路粗度等の水理条件に対する、雪の移動限界、水深増加率等の関係を調べることを目的としている。また、得られた理論結果の妥当性は、雪塊及び木片を用いた実験を行い検討する。

2. 水理学的検討

本節では、流雪溝内の雪輸送について水理学的に考察した結果について述べる。ここでは以下のように、雪の移動限界、最大流雪能力の算定、水深増加率の三点について考察した。

- | | | |
|----------------|-----------------|----------------------------|
| * 学生員 | 長岡技術科学大学大学院修士課程 | (〒940-21 新潟県長岡市上富岡 1603-1) |
| ** 正会員 工博 | 長岡技術科学大学助教授 | (同上) |
| *** 正会員 Ph. D. | 長岡技術科学大学教授 | (同上) |

2・1. 雪の移動限界

雪の移動限界を求めるにあたり、流雪溝内を雪が流れる状態として図-1 に示すように、雪の層が水深を超え溝内全体にわたっており、底面と接する状態を考える。雪層部分の空隙は均一に分布しているものとし、水は雪層内部の空隙部分や雪層と水路の間隙を流れるものと仮定する。また、図-2 に示したように雪層に対する釣合条件を考える。流下方向 dx 区間における力の釣合は図のように重力と浮力の斜面方向成分、雪層と底面との付着力 D 、水流による雪層への流体力 F_D から成る。 F_D には水流によるせん断応力 τ_s を考える。

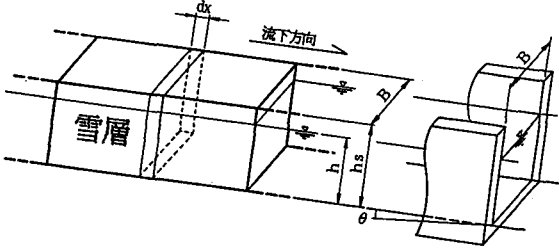


図-1. 流雪状態の仮定

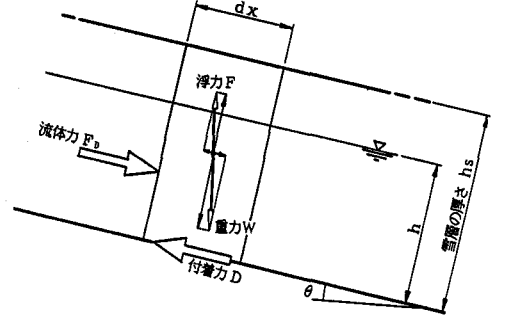


図-2. 固相に対する力の釣合

ここで、 B :水路幅、 θ :水路傾斜角、 h :水深、 h_s :雪層の厚さ、 W :重力、 F :浮力である。また、 ρ_s :雪の密度、 ρ_w :水の密度とすると重力 W と浮力 F は次式で示される。

$$W = \rho_s g c h_s B dx \quad (1)$$

$$F = \rho_w g c h B dx \quad (2)$$

ここで、 c は雪層部分における単位体積 V 当りの正味の雪の体積率であり固相率と呼ばれる。 c は式(3)のように定義する。

$$c = \rho_s V_s / \rho_w V \quad (3)$$

固相と液相の斜面方向の力の釣合条件式は以下に示すようになる。また、付着力 D は式(6)で与えられる。

$$\text{【固相】} \quad (\rho_s h_s - \rho_w h) g c B \sin \theta dx + \tau_s S_w dx - D = 0 \quad (4)$$

$$\text{【液相】} \quad \rho_w g h B \sin \theta dx - \tau_w S_0 dx - \tau_s S_w dx = 0 \quad (5)$$

$$D = \mu_0 (\rho_s h_s - \rho_w h) B c g \cos \theta dx \quad (6)$$

ここで、 μ_0 :雪層と水路底面との静止摩擦係数、 S_w :間隙通過を含めた水路と雪層の潤辺長、 S_0 :液相と側壁面及び底面との潤辺長、 g :重力加速度である。通常、十分に発達した乱流において、せん断応力はマンニングの法則に従うとされており、これを τ_s 、 τ_w に適用し整理すると、液相、固相の流速は各々についてのマンニングの n を、 n と n_s と与えて以下のように示される。

$$u_w = \frac{1}{n} R^{2/3} \sin^{1/2} \theta (1 - \phi)^{1/2} \quad (7)$$

$$u_s = \left(\frac{(1 - \phi)^{1/2}}{n} - \frac{\phi^{1/2}}{n_s (1 + \lambda)^{1/2}} \right) R^{2/3} \sin^{1/2} \theta \quad (8)$$

ここで、 ϕ は次式で表される。また、 λ は雪層内の空隙を表す係数、 R は径深である。

$$\phi = \left(\frac{\rho_s h_s}{\rho_w h} - 1 \right) c (\mu_0 \cot \theta - 1) \quad (9)$$

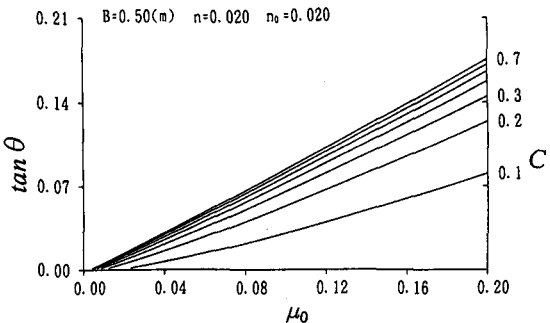
雪の斜面方向の釣合式は、図-2 より次式で表される。

$$(W - F) \sin \theta + F_D = D \quad (10)$$

雪層の移動条件は式(10)の左辺が右辺に比べて大きくなることであり、この式に、式(1)～(9)を代入すると以下の雪の移動限界式が導かれる。

$$\phi = \left(\frac{\rho_s h_s}{\rho_w h} - 1\right)c(\mu_0 \cot \theta - 1) \leq \frac{1}{1 + (n/n_s)^2 (s_0/s_w)} \tag{11}$$

この式(11)を満たせば雪層は流れることを示している。この式を解析した結果、静止摩擦係数 μ_0 、水路勾配、固相率 c の関係が以下の図-3のように得られた。この図は、静止摩擦係数が上昇すれば、より急勾配でなければ雪は流れないことを示している。



2・2・最大流雪能力の算定

図-3 雪層の移動限界勾配

与えられた流量における最大流雪能力を算定することによって実際の流雪溝の運営において、必要流量を容易に求めることができる。これは、固相（雪）と液相（水）に対してのそれぞれの連続式と力の釣合式を用いることにより、この二つの質量流量を求めるものである。

固相及び液相の連続式は、次式のように表される。

【固相】
$$Q_s = \rho_s u_s c h_s B \tag{12}$$

【液相】
$$Q_w = \rho_w u_w (1 - c) h B \tag{13}$$

ここで、先の液相と固相の流速(7)(8)式を代入し、以下の無次元操作を行うと液相と固相の流量比が次の(14)式のように得られる。

$$\xi = \frac{Q_s}{Q_w} \qquad \chi = \frac{\rho_s h_s}{\rho_w h}$$

$$\xi = \chi \left(1 - \frac{n}{n_s} \frac{1}{(1 + \chi)^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{\phi}{1 - \phi}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \tag{14}$$

式(14)は、それぞれ無次元化された流量比ξと水深比χとの関係を表している。下の図-4はそれぞれ異なった水路と雪層との静止摩擦係数 μ_0 におけるξとχの関係グラフ化したものである。

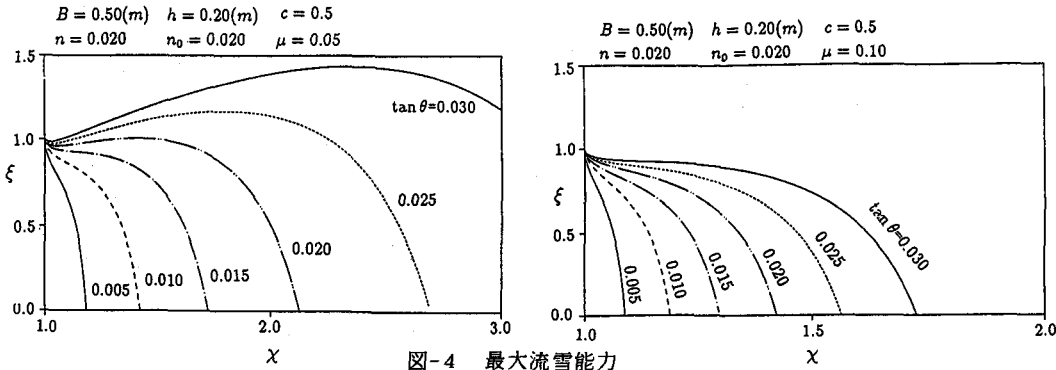


図-4 最大流雪能力

ここで、 n, n_s はマンニングの粗度係数である。このグラフより、与えられた流量における最大流雪量を容易に求めることができる。

2・3・投雪時の水深増加率

流雪溝に雪を投入すると水深は増加する。流雪溝の深さが増加した水深よりも浅い場合、溢水を起こす危険性がある。流雪溝の深さを決定するためには投雪に伴う水深増加現象の把握が必要である。ここでは、この水深増加率を理論的に検討した。雪投入による水深の増加率は、雪層がある場合の水深と雪層がない場合の水深の比である。径深が、 $R=h/(1+2h/B)$ となることを考慮すると、式(12)より次式を得る。

$$h = \left[\frac{Q_w}{\rho_w(1-c)B} \frac{n(1+2h/B)^{2/3}}{(\sin \theta(1-\phi))^{1/2}} \right]^{3/5} \quad (15)$$

流雪溝内に全く雪がない場合の水深は、式(15)において、 $c=0$ 、 $\phi=0$ である。このとき諸量に添え時0をつけて表すものとすれば次式のようになる。

$$h_0 = \left[\frac{Q_w}{\rho_w B} \frac{n_0(1+2h_0/B)^{2/3}}{(\sin^2 \theta)} \right]^{3/5} \quad (16)$$

(15)(16)式より水深増加率は次式で表される。

$$\frac{h}{h_0} = \left[\frac{1}{1-c} \frac{n}{n_0} \left(\frac{1+2h/B}{1+2h_0/B} \right)^{2/3} \frac{1}{(1-\phi)^{1/2}} \right]^{3/5} \quad (17)$$

以下の図-5は式(17)より水深増加率と水路勾配、固相率の関係を表したものである。(a)は、マンニングの粗度係数を投雪前と投雪後で変化しないと仮定したものであり、(b)は、投雪後、マンニングの粗度係数は2倍になるとして作製したグラフである。本図において、水深増加率が急激に下がる地点があるが、その地点が式(11)の示す移動限界であることが分かっている。すなわち、水深増加率は雪が移動し始めると急激に下がるのがこの図より分かる。

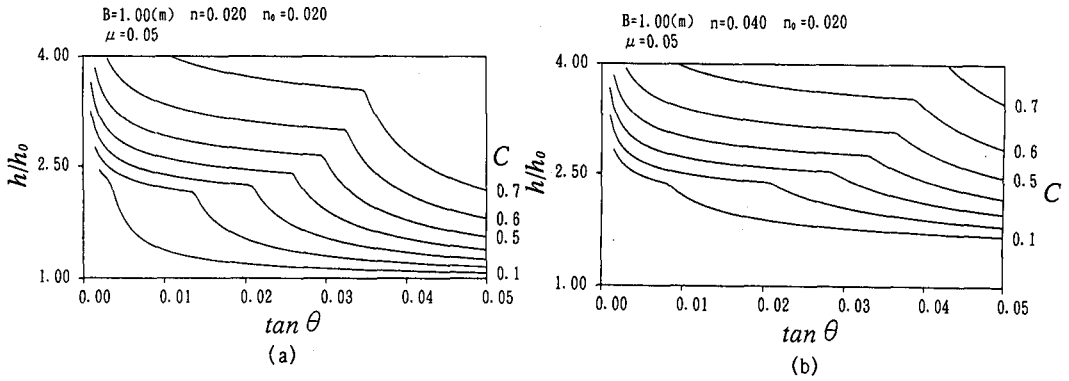


図-5 水深増加率

3. 流雪溝内の雪輸送の実験的検討

検証実験は、雪の移動限界と水深増加率についてそれぞれ行った。

3・1. 雪層の移動限界

本実験は、幅0.40m、長さ10mの可変勾配二次元開水路を使用し、水路に大、中、小の立方体に成形した雪塊を投入し、移動するか否かを流量と勾配を変化させて調べたものである。表-1はそれぞれ大、中、小の雪塊の諸元である。値はすべて複数の実験の平均値である。表中で静止摩擦係数は実験水路において求めた。

もう一つ、本実験において考慮にいれなければならない現象として水面形の変化がある。いま、液相が雪層に当たったときの水面形の変化を以下の図-6のように仮定すると、 h' は以下の式(18)で与えられる⁵⁾。

$$h' - h = \frac{1}{2gn^2} \frac{(Bh)^{10/3}}{(B+2h)^{4/3}} \left[\frac{1}{c^2(B-B_s)^2h^2} - \frac{1}{B^2h^2} \right] \quad (18)$$

ここで、 h は等流水深、 h' :せき上げられた水深、 c は物体の形状による係数で、雪層は立方体であるので0.8とした。

	大	中	小
質量(g)	2383.0	728.0	96.6
h_s (cm)	15.0	10.0	5.0
B_s (cm)	15.0	10.0	5.0
密度 ρ_s (g/cm ³)	0.70	0.73	0.77
静止摩擦係数	0.33	0.32	0.39

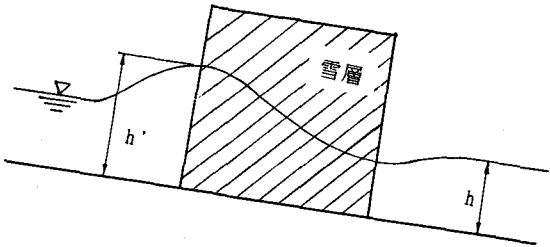


表-1 雪塊の諸元

図-6 実験による水面形の変化

本実験においては、移動限界における等流水深を h とし、実際には h' の水深をもった流体力が雪層に作用すると仮定する。また、固相率 C については、雪層の幅を B_s 、水路幅を B とすると、 $C = B_s / B$ となる。次の図-7に実験結果を示す。

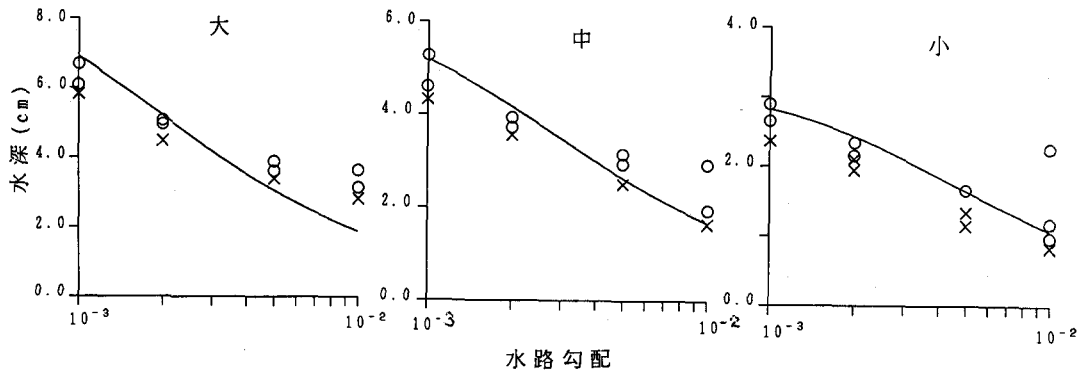


図-7 移動限界の実験結果 (○:移動 ×:移動せず)

図-7は実験時の水路勾配と等流水深において雪塊が移動したか否かを調べたものである。図中の実線は水理学的検討によって得られた式(11)により計算された移動限界水深である。実験結果から明らかなように、理論値と実測値においてかなりの相関性がみられた。理論値と離れた部分においては、水温が14℃とかなり高かったため融雪効果の影響を受けたこと、静止摩擦係数の測定精度、一つの雪塊内における雪質の不均一性などがあげられる。

3・2.水深増加率

本実験も移動限界実験時と同じ水路を用いた。また、多量の雪を用意することが困難であったため、疑似雪塊として一辺約4.5cmの木片を760個用意した。木片の表面には水没時の密度変化を防ぐためにシリコンコーティングが施してある。木片の平均密度は0.54g/cm³である。また、固相率 c は次の式(19)のように求めた。

$$c = \frac{\rho_s Q_s}{\rho_w (Q_w + Q_s)} \tag{19}$$

ここで、 ρ_s :木片の密度、 ρ_w :水の密度、 Q_s :木片の投入量(cm³/s)、 Q_w :流量(cm³/s)である。以下の図-8にその実験結果を示す。

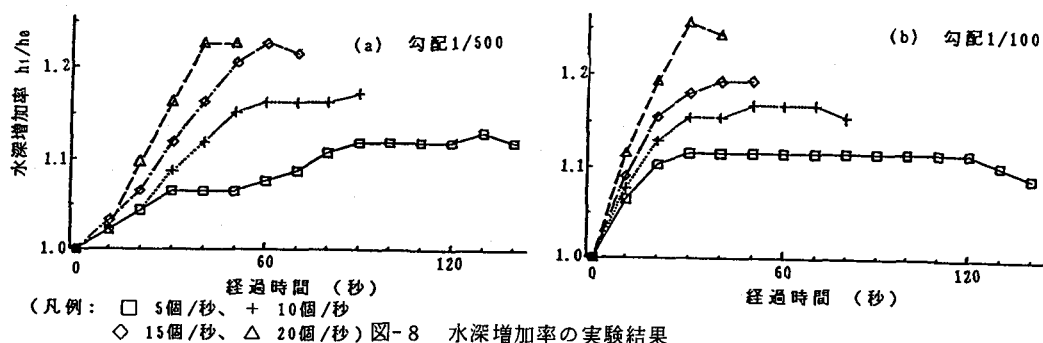
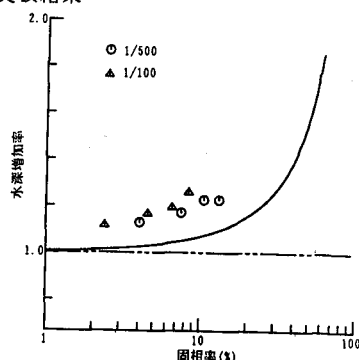


図-8は木片投入後の経過時間と水深増加率の関係を示したものである。この図より、木片投入に伴い水深が増加し、投入個数が多いほど水深増加率が大きくなることが理解される。この結果と理論検討を比較するために式(17)による計算値と実測値を以下の図-9に示す。木片の投入量の限界で、固相率の非常に低い部分での検証しかできなかったが、理論値と実験値が比較的近いこと、また共に増加傾向にあることなどが明らかになった。



4. 結論

流雪溝内において雪水二相流に考え方にに基づき、それぞれの連続式と釣合式をたてたことにより、種々の条件に対する雪層の移動限界、任意の流量に対する最大流雪能力、雪投入時における流雪溝内の水深増加率について水理学的に算定することができた。これによって、流雪溝運営時における必要流量の算定、また逆に投雪量の調節も容易に行うことが可能になる。また、水深増加率が算定できたことにより、流雪溝の溢水等の被害を未然に防ぐことが可能となる。

さらにこの理論検討の妥当性を調べるために検証実験を行なった。その結果、雪の移動限界については理論値と実験値に良い一致がみられた。また、水深増加率に関しても限られた実験条件ではあるが、実験値と理論値がほぼ一致した。

なお、今後の課題としては、融雪効果の考慮、様々な雪質（ざらめ雪、新雪等）での実験、水深増加率の実際の雪での実験、水路の屈曲部、分岐点での水理学的検討などがあり、これらについて今後検討していく予定である。

謝辞

本研究の一部は長岡技術科学大学技術開発センタープロジェクトの一環として行われた。また、実験その他において、本学 山本 浩技官、本学大学院学生、備前 亨氏、小池正子氏、本学学部学生、西川 淳氏の多大なご協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 流雪溝設計運営要領、建設省北陸地方建設局監修、1983.9.
- 2) 高橋博、中村勉、雪氷防災、白亜書房、1986, pp.179-193.
- 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, pp.801-806.
- 4) 福嶋祐介、流雪溝における雪塊の運動シミュレーション、第45回年次学術講演会講演概要集、第11部、土木学会、1990, pp.534-535.
- 5) 荒木正夫、椿 東一郎 水理学演習下巻 森北出版