

流雪溝における雪塊の移動条件

福嶋祐介*・早川典生**・村上正人***

流雪溝における単一の雪塊の移動限界について理論的・実験的検討を行った。理論では、大きな雪塊に作用する流下方向の力の釣合から雪の移動限界を求めた。また、理論との比較のため3種類の水路を用いて雪塊及び模擬雪塊を用いた実験を行った。この実験結果を理論値と比較したところ、様々な雪質、水路床勾配、水路底面条件に対する実験結果が理論で説明できる事を示した。

Key Words : snow, snow removing system, open channel flow, resistance law

1. 序 論

流雪溝は日本海地方の積雪地帯において、除排雪の有効な手段として用いられているものである。新潟県、山形県、富山県などは豪雪地帯であるが、冬季の気温はそれほど低くはなく、降雪は湿っていることがおおい。このような地域では、開水路において流水の作用により雪塊を押し流す流雪溝が用いられている。流雪溝が設置されている代表的な地域として、新潟県小出町、小千谷市、十日町市、新井市、秋田県の横手市などが挙げられる。これらの地域は、冬季の気温がそれほど低くなくある程度の流水量が確保されること、雪を押し流すための急勾配の地形であること、などの流雪溝に適した条件を満たしている。

流雪溝に対して次のような除排雪の手法がある(流雪溝設計運営要領¹⁾、高橋、中村²⁾)。消雪パイプ、機械除雪、ロードヒーティングなどである。消雪パイプは冬季でも温度の高い地下水を汲み上げ、路上に流し雪を融かす施設であり、新潟県長岡市、上越市などでその普及は著しい。しかし、消雪パイプは地下水を多量に汲み上げるため、地盤沈下など環境面での問題が顕在化してきた。ブルドーザ、ロータリー車などによる機械除雪はコストが安いのが既成市街地などの住宅密集地に入ることが困難であり、雪捨て場への運搬に手間と費用がかかる欠点を有している。ロードヒーティングはコストがきわめて高く、広い地域での利用は困難である。

流雪溝は他の除排雪手法に対して次のような長所を有している。溝内の水によって雪が河川、放水路などに流されるため、運搬の手間と費用がかからない。下水や夏

期の雨水、消雪パイプの排水施設としても利用できる。消雪パイプやロードヒーティングに比べ維持費が安い。住民の相互協力を通じて地域のコミュニティーの形成を図ることができる。目の前で雪が流れることが良い心理的効果がある。地下水・化石燃料を使わないので、環境保護の点で優れている。一方、流雪溝の設置に当たって考慮すべき点は次の通りである。雪塊の投入を適切に行わないと、単に雪が詰まるばかりでなく、溢水し人家・道路に浸水することがある。転落事故等の危険性がある。流雪溝の維持管理及び雪塊の投入にあたり住民の協力が不可欠である。水源の確保、地形、水路床勾配などの制約がある。既成市街地に設置する場合建設費が高い、などである。

近年、こうした流雪溝の特性が評価され、あまり勾配が大きくとれない地域での流雪溝の設置が検討されている。このような地域での流雪溝を設置するためには、緩勾配地での流雪溝の特性を知る必要がある。与えられた流水量に対して輸送可能な流雪量は流雪能力と呼ばれる。流雪能力は、流水量、粗度係数や水路の表面の状態などの水路の特性、新雪、しまり雪、ザラメ雪などの雪質などによって変化する。水量が豊富であり、雪が流雪溝内で浮遊する状態にあれば、雪はほぼ水の流速と同じ速度で流下する(福嶋³⁾)。佐藤、首藤⁴⁾はこのような場合の流雪溝内の力学機構を理論的に検討した。一方、水量があまり多くない場合には、雪塊は水路床と接して流れる。福嶋ら^{5),6)}は、このような場合の流雪能力を理論的に求め、実験結果と比較して、様々な水理条件での流雪能力を求めている。また、大熊ら⁷⁾は、流雪溝の底面と側面に塗装した「塗装流雪溝」について研究を行い、その有効性を検討している。以上の研究は雪が連続的に流れる条件での、流雪能力について検討したものである。

流雪溝における雪輸送を考えると、最も基本的な機構は、単一の雪塊が流れるか否かであろう。すなわち、

* 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系 (〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)

** 正会員 Ph.D 長岡技術科学大学教授 工学部建設系

*** 正会員 工修 (株)建設技術研究所

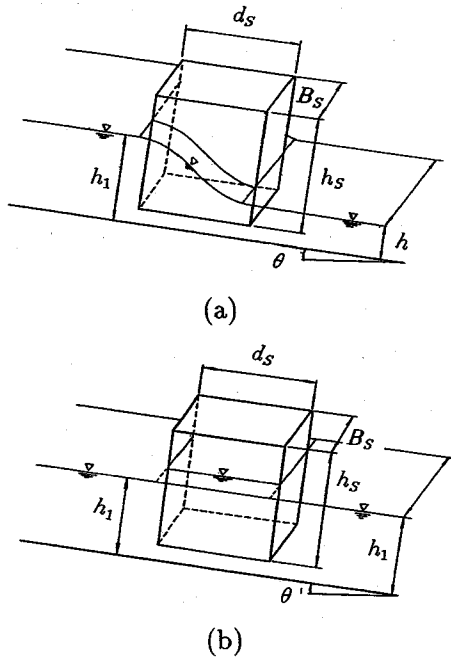


図-1 流雪溝内の雪塊の状態と水面形

ある水利条件のもとでの雪塊の移動限界を知ることである。この場合では、雪塊の大きさが水路幅の1/2以上のきわめて大きい物体が水路中に存在するときの流れを適切にモデル化し、雪の静止と移動の機構を検討する必要がある。このような雪塊の移動限界に着目した研究はこれまで十分に行われていない。本研究では、単一の雪塊が流雪溝内にある場合について理論的に検討し、その移動限界式を提案する。さらに雪塊による実験と模擬雪塊として木片を用いた実験を行い、雪塊の移動限界式の妥当性を検討する。

2. 投入直後の雪塊の移動条件

(1) 理論に用いた仮定

流雪溝における閉塞現象は、屈曲部や湾曲部を除いた直線水路を考えれば、投入直後が最も発生し易いと考えられる。水路内での雪の状態は単一の雪塊が置かれた場合であろう。そこで、直線水路に単一の雪塊が投入されたときの雪移動の機構を論理的に取り扱う。解析にあたっての主たる仮定を列挙する。

- (1) 図-1に示すように雪塊は高さ h_s 、長さ d_s 、幅 B_s の直方体とする。
- (2) 雪塊中の空隙は均一に分布している。
- (3) 水温は 0°C 付近であり、融雪の影響は無視できる。
- (4) 流雪状態として以下の二つを考える。

(a) 図-1(a)に示すように、上流側の水深が雪塊によって堰上げられる場合。

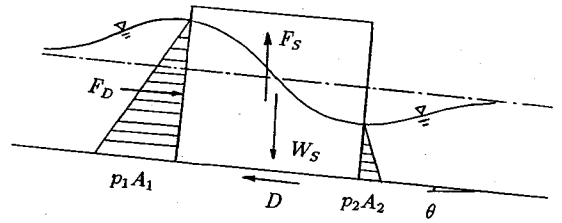


図-2 雪塊に作用する力の釣り合い

(b) 図-1(b)に示すように、上流と下流の水深がほぼ等しい場合。

(2) 雪塊に働く力の釣合方程式

本節では、雪塊に働く力の釣合式を前節の仮定に基づき理論的に取り扱う。図-2のように雪塊に作用する重力 W_s と浮力 F_s は次のように表される。

$$W_s = \rho_w g (1 - \lambda) V_s = \rho_w g (1 - \lambda) h_s B_s d_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F_s = \rho_w g V_i = \rho_w g (1 - \lambda) h B_s d_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V_s は雪塊の体積、 V_i は水中での氷の体積である。 ρ_w は水の密度、 λ は雪塊の空隙を表しており、雪塊の見かけの密度を ρ_s としたとき、次式で表される。

$$\rho_s = \rho_w (1 - \lambda) \quad \dots\dots\dots (3)$$

斜面方向の雪塊の力の釣合式を考える。雪塊に作用する力として、重力、浮力の斜面方向成分、雪塊と底面との摩擦力 D 、雪塊に働く抗力 F_D を考慮する。また、雪塊の前面と後面での水深が異なることから、雪塊に作用する圧力差を ΔP として考える。

雪塊の重力と浮力の斜面方向成分：

$$(W_s - F_s) \sin \theta = (1 - \lambda) (\rho_w h_s - \rho_w h) g B_s \sin \theta d_s \quad \dots\dots\dots (4)$$

雪塊と底面の摩擦力：

$$D = \mu \phi [W_s - F_s] \cos \theta = \mu (1 - \lambda) \phi [\rho_w h_s - \rho_w h] g B_s \cos \theta d_s \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 μ は水中の雪塊の摩擦係数である。また、 $\phi[x]$ は次のような作用素である。

$$\phi[x] = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ x & x > 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

水流による抗力：

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w c_D u^2 A_s \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 c_D は抗力係数、 u は水流の流速、 $A_s = h_1 B_s$ は流下方向の雪塊の投影断面積である。

前面と後面の圧力差：

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_w g h_1 A_1 - \frac{1}{2} \rho_w g h_2 A_2 = \frac{1}{2} \rho_w g B_s (h_1^2 - h_2^2) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 h_1 、 h_2 はそれぞれ雪塊の上流と下流の水深、 A_1 、 A_2 はそれぞれ、上流と下流の水中の断面積である。

雪塊が閉塞する限界、すなわち、雪塊の移動限界では、

雪塊と底面との摩擦力，式 (5) は静止摩擦係数 μ_0 を用いて次のように表される。

$$D = \mu_0 (1 - \lambda) \phi [\rho_i h_s - \rho_w h] g B_s \cos \theta d_s \dots\dots\dots (9)$$

以上の準備のもとで雪塊に作用する斜面方向の力の釣合式は次のように表される。

$$(W_s - F_s) \sin \theta + F_D + \Delta P = D \dots\dots\dots (10)$$

上式 (10) に，式 (4)，(7)，(8)，(9) を代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} & (\rho_i h_s - \rho_w h) (1 - \lambda) g B_s d_s \sin \theta \\ & + \frac{1}{2} \rho_w c_D u^2 h_1 B_s + \frac{1}{2} \rho_w g B_s (h_1^2 - h_2^2) \\ & = \mu_0 \phi [\rho_i h_s - \rho_w h] (1 - \lambda) g B_s d_s \cos \theta \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

雪が移動する条件は，上式 (11) の左辺が右辺に比べて大きくなることであり，若干の整理を行うと次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho_w c_D u^2 h_1 B_s \geq \\ & (\rho_i h_s - \rho_w h) (1 - \lambda) g B_s d_s (\mu_0 \cos \theta - \sin \theta) \\ & - \frac{1}{2} \rho_w g B_s (h_1^2 - h_2^2) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

図-1 (b) のように上下流の水位差が無視できる場合には $\Delta P = 0$ と置いて次式を得る。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho_w c_D u^2 h_1 B_s \geq \\ & (\rho_i h_s - \rho_w h) (1 - \lambda) g B_s d_s (\mu_0 \cos \theta - \sin \theta) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

(3) 雪塊の移動条件式

本節では，前節での式 (11) を用いて与えられた雪塊を流下させるために必要な流量，言い換えれば与えられた流量に対し移動可能な雪塊の体積，重量の算定式を求める。式 (11) を u に対して整理すると次式となる。

$$\begin{aligned} u^2 = & \frac{g}{c_D h_1} \left\{ \frac{2 d_s}{\rho_w} (1 - \lambda) \right. \\ & \times (\rho_i h_s - \rho_w h) (\mu_0 \cos \theta - \sin \theta) - h_1^2 + h_2^2 \left. \right\} \dots (14) \end{aligned}$$

また，連続の式から u を上流側の水深 h_1 を使って表すと

$$u = \frac{Q_w}{h_1 B} \dots\dots\dots (15)$$

ようになる。ここで， Q_w は流量である。この式 (15) を式 (14) に代入し，若干の整理を行うと次式を得る。

$$\frac{Q_w^2}{h_1^3 B^2} = \frac{g}{c_D h_1} (2 \phi_1 d_s \sin \theta h - h_1^2 + h_2^2) \dots\dots\dots (16)$$

ここで， h は浮力の作用する水深であり，上・下流の水深 h_1 ， h_2 を用いて次のように近似する。

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} \dots\dots\dots (17)$$

また， ϕ_1 は次のような無次元関数である。

$$\phi_1 = (1 - \lambda) \left\{ \frac{\rho_i h_s}{\rho_w h} - 1 \right\} (\mu_0 \cot \theta - 1) \dots\dots\dots (18)$$

以上の演算により，流量が求められ次式のように表すことができる。

$$Q_w = \left[\frac{g B^2}{c_D} (2 \phi_1 d_s \sin \theta h_1 h - h_1^2 + h_2^2 h_1) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (19)$$

図-1 (b) のように，上・下流の水深がほぼ等しい場合には，上式 (19) は次のように表される。

$$Q_w = \left(\frac{2 g B^2 d_s \phi_2 h_1^2 \sin \theta}{c_D} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (20)$$

ここで， ϕ_2 は次のような無次元関数である。

$$\phi_2 = (1 - \lambda) \left(\frac{\rho_i h_s}{\rho_w h_1} - 1 \right) (\mu_0 \cot \theta - 1) \dots\dots\dots (21)$$

式 (2)，(7)，(8)，(9) を式 (10) に代入することにより，雪塊の重量 W_s は次のように求められる。

$$\begin{aligned} W_s = & F_s + \frac{1}{(\mu_0 \cos \theta - \sin \theta)} (F_D + \Delta P) \\ = & \rho_w g (1 - \lambda) B_s d_s h + \frac{\rho_w g B_s}{2 (\mu_0 \cos \theta - \sin \theta)} \\ & \times \left(\frac{c_D}{g} u^2 h_1 + h_1^2 - h_2^2 \right) \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

上式に (15)，(17) を代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} W_s = & \frac{\rho_w g B_s}{2} \left\{ (1 - \lambda) d_s (h_1 + h_2) \right. \\ & \left. + \frac{1}{(\mu_0 \cos \theta - \sin \theta)} \left(\frac{c_D Q_w^2}{g B^2 h_1} + h_1^2 - h_2^2 \right) \right\} \dots\dots (23) \end{aligned}$$

同様にして，圧力差を無視できる場合には次のような式を得る。

$$\begin{aligned} W_s = & \frac{\rho_w g B_s}{2} \\ & \times \left\{ 2 (1 - \lambda) d_s h_1 + \frac{1}{(\mu_0 \cos \theta - \sin \theta)} \frac{c_D Q_w^2}{g B^2} \right\} \dots (24) \end{aligned}$$

(4) せき上げ水深

本節では，雪塊の移動限界式で用いられている上流側の水深を理論的に求める。図-3 (a) のように雪塊の幅 B_s が水路幅と比べて小さい場合は水深は断面 2 において限界水深以下にはならない。この場合の上流の水深は，橋脚による堰上げ水深を求めるために導かれた D'Aubuisson の式⁸⁾を用い水深を求めることができる。図-3 (a) から断面 1，2 にベルヌイの式を適用すると次式を得る。

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_e \dots\dots\dots (25)$$

ここで， h_1 ， h_2 は，それぞれ，断面 1，2 の水深であり， v_1 ， v_2 は，それぞれ，断面 1，2 での断面平均流速， g は重力加速度である。 h_e はエネルギー損失水頭でありエネルギー損失係数 f を用いて次のように表される。

$$h_e = f \frac{v_2^2}{2g} \dots\dots\dots (26)$$

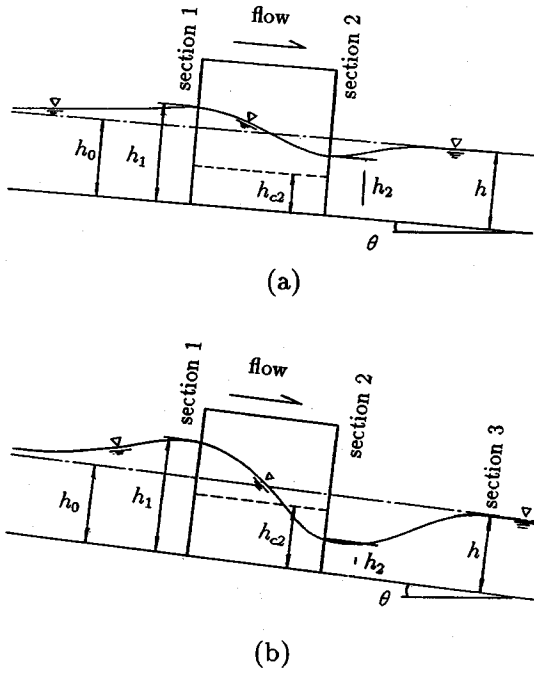


図-3 雪塊が水路にあるときの水面形の変化

ここで、式 (25) を代入すると式が得られる。

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} (1+f) \quad (27)$$

また、連続の式から次の二つの式を得る。

$$v_1 = \frac{Q_w}{Bh_1};$$

$$v_2 = \frac{Q_w}{(B-B_s)h_2} \quad (28)$$

上の二つの式を式 (27) に代入すると次式を得る。

$$h_1 = \frac{Q_w^2}{2g} \left\{ \frac{1}{c^2 (B-B_s)^2 h_2^2} - \frac{1}{B^2 h_1^2} \right\} + h_2 \quad (29)$$

ここで、 c は流れにおかれた物体の平面形状によって定められる係数であり、次式で表される。

$$c^2 = \frac{1}{1+f} \quad (30)$$

D'Aubuisson⁹⁾によれば、物体の水平断面形状が長方形の場合で $c=0.8$ 、上流側の形状が三角形の場合として $c=0.9$ になるとしており、平均的には $c=0.85$ 程度の大きさを持つことが推定される。

次に、図-3 (b) のように雪塊の幅が水路幅と同じくらい大きい場合を考える。このとき、断面2において水深は限界水深に比べて小さくなり、断面2から断面3の間で跳水が発生したエネルギー損失が生ずる。この場合には、下流の等流水深から上流の水深を求めることはできない。ここでは、断面1と限界水深を生ずる断面の間のベルヌイの定理から堰上げ水深を求める。このとき、

表-1 実験水路の諸元

No.	B(m)	L (m)	n	bed material
Channel A	0.4	11.0	0.01	steel plate
Channel B	0.4	10.0	0.01	acryl or veneer
Channel C	0.25	21.5	0.01	veneer plate

式 (29) を求めるのと同様の操作を行うことによって次式を得る。

$$h_1 = \frac{Q_w^2}{2g} \left\{ \frac{1}{c^2 (B-B_s)^2 h_{c2}^2} - \frac{1}{B^2 h_1^2} \right\} + h_{c2} \quad (31)$$

ここで、 h_{c2} は断面2における限界水深であり、次式で表される。

$$h_{c2} = \left\{ \frac{Q_w^2}{g(B-B_s)^2} \right\}^{1/3} \quad (32)$$

雪塊が水路幅に比べて充分に小さい場合には式 (29) を用い、雪塊の幅がこれより大きい場合には式 (31) を用いればよい。

3. 単一の雪塊の移動条件の実験

(1) 実験の概要

前節で、流雪溝の中での単一の雪塊の移動限界について検討した。本節では雪の移動実験の結果について述べるとともに、理論式の妥当性を検討する。本実験では雪を用いた実験と、木片を模擬雪塊に見立てた実験を行った。木片を用いた実験を行った理由は次の通りである。木片を用いた場合、融雪の影響を排除できる。形状が変化しない。表面にシリコンコーティングを施すことにより水の吸水の影響を無視できる。無雪期に実験を行うことができる。実験は図-4の (a), (b), (c) の実験装置を用いて行った。実験装置の諸元は表-1にまとめて示す。ここで装置 (a), (b) は可変勾配水路、装置 (c) は水路床勾配 1/1 000 で一定である。底面の粗さを表すマンギングの n はいずれの水路でも $n=0.01$ である。

本実験の概要は次の通りである。実験では、任意の流量、水路床勾配に設定し、図-4 (a) に示す場所に雪塊 (木片) を静止させ、移動するか否かを調べた。水深は、雪塊 (木片) の影響が小さいと考えられる下流側で測定した。実験条件を表-2にまとめて示す。表中 S は雪 (snow) であることを、 W は木片 (wood) であることを示している。それぞれ、 $S-1 \sim S-4$ は雪塊の大きさを変えた供試体であり、 $W-1, W-2$ は木片の大きさを変えた供試体である。水路床勾配は雪塊では 1/1 000 ~ 1/100 の間で変化させた。木片では 1/8 000 ~ 1/100 の間で変化させた。

装置 (b) (Channel B)、装置 (c) (Channel C) での実験は次のように行った。予め体積と重さを測定した雪塊を水路の上流部より一定間隔で投入し雪塊が移動

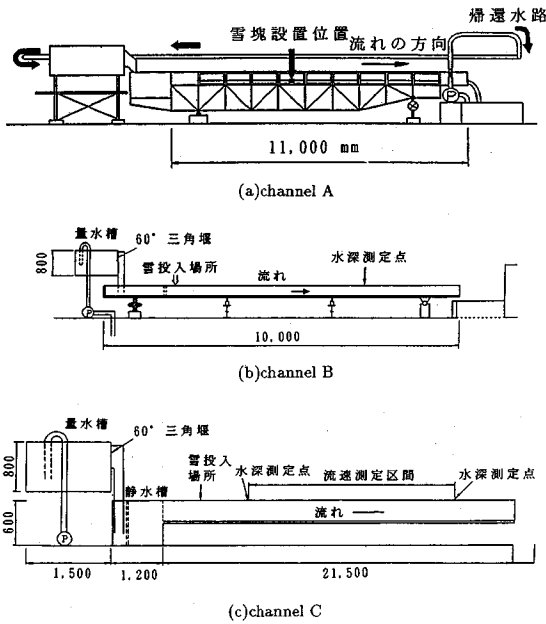


図-4 実験水路 Channel A, Channel B, Channel C

表-2 雪塊及び木片による供試体の諸元

specimen No.	dimension			mass (g)	density (g/cm ³)	static friction coeff. μ ₀
	height hs(cm)	width Bs(cm)	length ds(cm)			
S-1	7.5	7.5	7.5	310	0.74	0.35
S-2	15.0	15.0	15.0	2310	0.63	0.33
S-3	5.0	5.0	20.0	300	0.60	0.39
S-4	10.0	10.0	20.0	1300	0.65	0.32
W-1	7.3	7.6	7.1	265	0.67	1.04
W-2	4.8	4.5	4.6	61	0.61	0.88

するか否かを判定した。このような測定を数種類の流量に対して行った。表-3においてB-1, B-2, B-3, B-4はChannel Bを用いた実験であり、C-1, C-2はChannel Cで行った実験である。底面の条件は表-1に示しているように、Channel Bではベニヤ板とベニヤ板に珪砂を張り付けた珪砂板であり、Channel Cはベニヤ板のみである。

(2) 移動限界の理論と実験値との比較

図-5は雪塊の移動限界を示したものである。縦軸に流量 Q_w (l/s) を横軸に水路床勾配をとっている。図中○印は雪塊が移動したことを、×印は移動しなかったことを示す。△印はこれらの遷移領域(○か×かはっきりしない場合)であり、雪塊が投入直後には静止しているがしばらくして流れたもの、また、一旦流れたが下流で静止したものなどを示す。以下いくつかの図があるが記号の意味はこの図の記号と全て同じであることに留意されたい。また、実線はせき上げ水深として式(31)を用いこれを式(19)に代入して求めた理論値である。図

表-3 実験条件

Run No.	I	ρ _s (g/cm ³)	μ ₀	bed condition
B-1	1/100	0.53	1.08	silicic sand plate
B-2	1/1000	0.55	1.08	silicic sand plate
B-3	1/100	0.31	0.86	veneer plate
B-4	1/2000	0.41	0.86	veneer plate
C-1	1/1000	0.27	0.70	veneer plate
C-2	1/1000	0.29	0.70	venner plate

5 (a)~(d)まで順に供試体番号S-1~S-4である。式(19)における諸係数は以下のように定めた。

抗力係数 $c_D=0.5$

雪塊の形状によって決まる係数 $c=0.85$

下流側的水深 h_2 式(19)において h_2 の項は h_1 の項に比べて十分に小さくなるのでこれを無視した。

実線の理論値が、雪移動している状態の○印と移動しなかった状態の×印の中間にくれば理論値と実験値と一致していると判断することにする。このような観点からみると、図-5(a)~(d)に示されたように、理論値は広い範囲で実験値の挙動を説明できることが示される。

図-6(a)~(d)は縦軸に等流水深 h_0 を横軸に水路床勾配をとって示したものである。図中の実線は流量 Q_w に対する等流水深をとったものである。ここで等流水深が次式で計算される。

$$h_0 = \left[\frac{Q_w n (1 + 2h/B)^{2/3}}{B \sin^{1/2} \theta} \right]^{3/5} \dots \dots \dots (33)$$

ここで、 n はマンニングの粗度係数である。これらの図より水深をパラメータとする本図においても、雪塊の移動限界において理論値は実験値の概略を説明できる。

図-7(a), (b)は木片を用いた場合の移動限界を示したものである。縦軸に流量、横軸に水路床勾配をとっている。実線は式(19)である。この場合水路床勾配が1/1000以下の場合には理論値は○印と×印の中間のところに位置し実験値との対応はよい。一方水路床勾配がこれより小さくなると、実験値に比べ理論値が過少になっている。この理由として、水路床勾配が小さくなると水路が短いために下流部での低下背水が大きくなることが考えられる。これは水路の長さがChannel Aでは11mと短く水路床勾配が設定値からはずれるなどの影響が現れているためであろう。

図-8(a), (b)は木片を用いた場合に移動限界を、縦軸に等流水深(式(33))、横軸に水路床勾配を示したものである。これらの図より、広い範囲の水利条件に対して木片の移動限界を理論的に説明できることがわかる。木片の移動限界は、重力と浮力の釣り合いが大きく

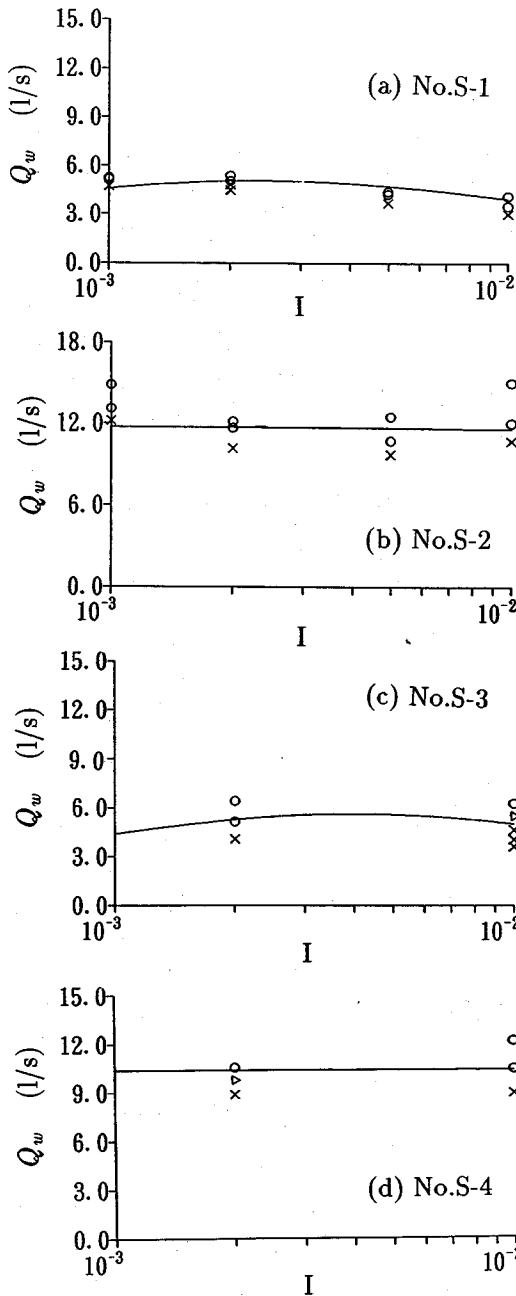


図-5 流量と水路床勾配でみた雪塊の移動限界

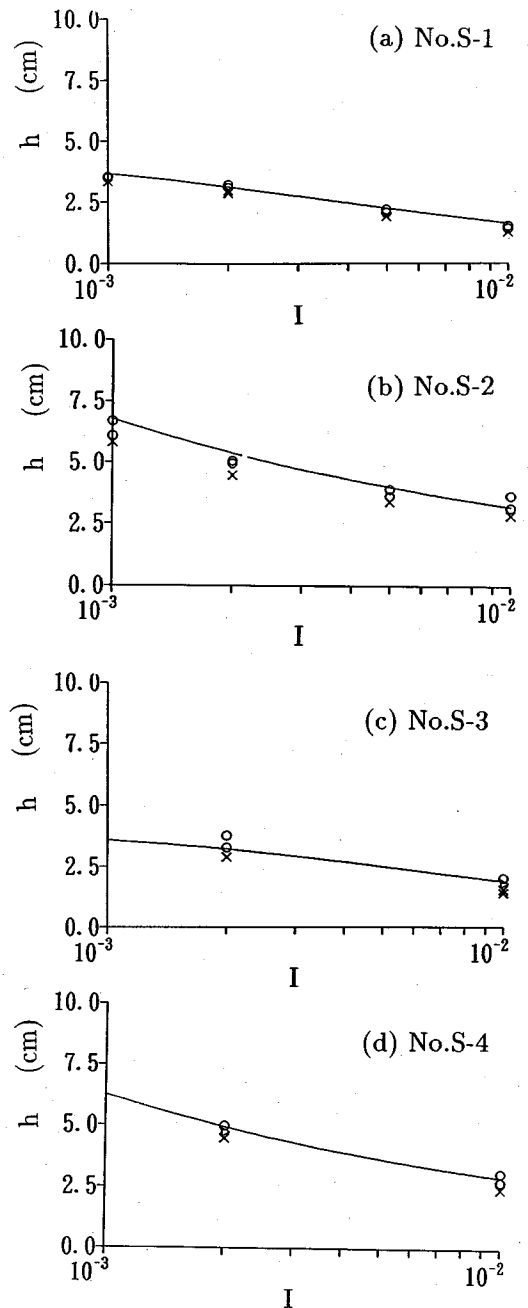


図-6 水深と水路床勾配でみた雪塊の移動限界

影響する。ここで示すデータは直接水深を測定した結果であり、浮力の大きさをそのまま測定していることになる。図-7では流量を介して水深を予測しており、直接水深を測定した図-8のほうが理論と実験値との一致がよいのは当然であるように思われる。

(3) 移動限界式による最大流雪能力の算定

ここでは、Channel BとChannel Cを用い、雪塊を断続投入し、最大流雪能力を求めた実験結果と本論文で

提案した理論式との比較を行う。Channel BとChannel Cに対する実験結果に対する実験条件を表-3にまとめて示す。ここで、B-1、B-2はザラメ雪、B-3、B-4がしまり雪、C-1、C-2は新雪である。これらの実験では断続して雪を投入しているので雪塊の上流の水深と下流の水深がほぼ等しくなる。従って、移動限界式としては式(24)を用いる。

図-9はChannel Bで行った実験結果である。縦軸

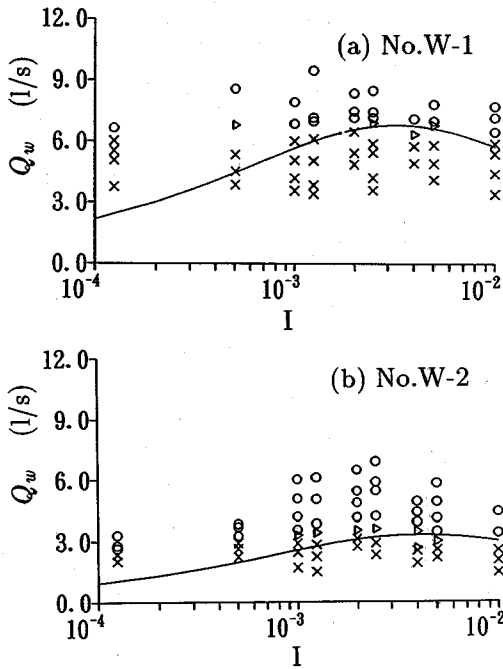


図-7 流量と水路床勾配のみた木片の移動限界

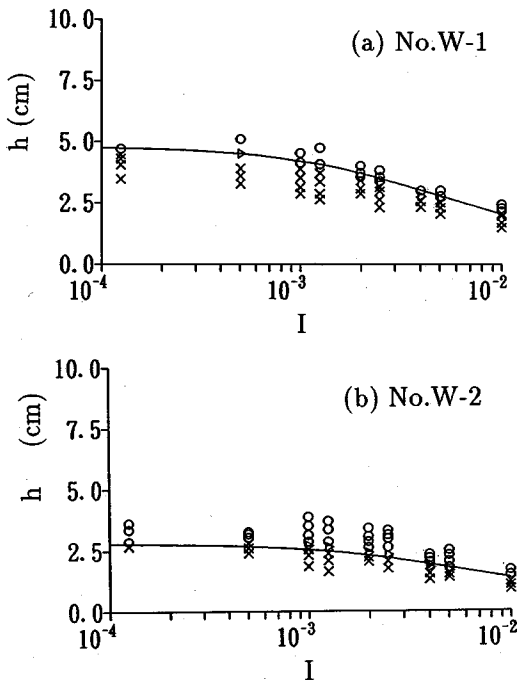


図-8 水深と水路床勾配のみた木片の移動限界

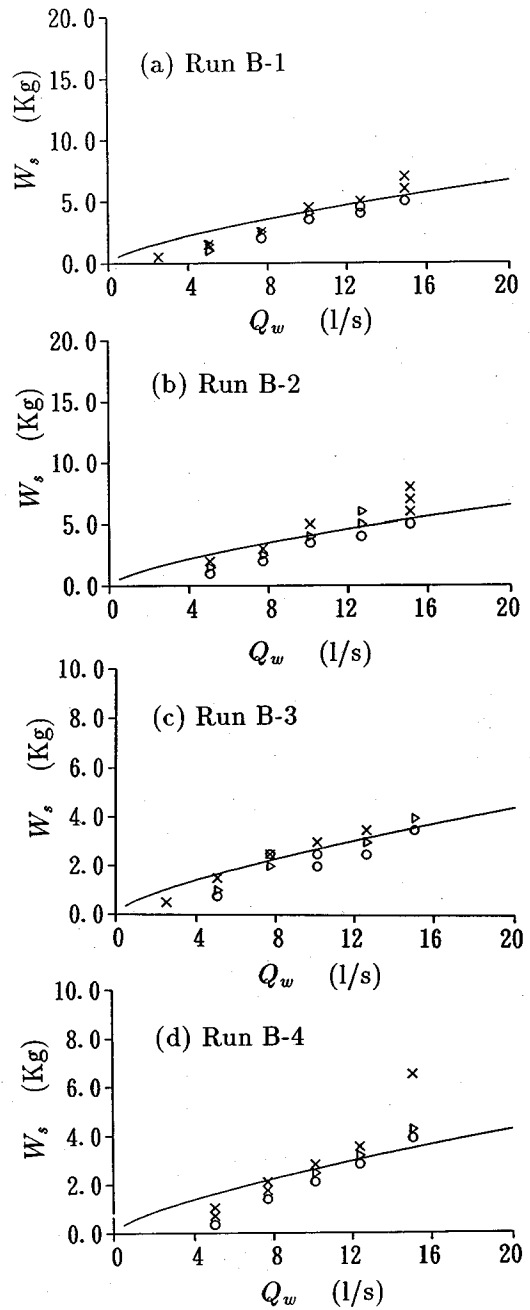


図-9 単一の雪塊の移動限界 (Channel B)

に単一の雪塊の重量，横軸に流量をとっている。図-9 (a)~(d) まで，水路床勾配を 1/100~1/2 000，雪の見かけの密度を 0.31~0.55 まで変化させているが，流量の小さい範囲を除けば，理論値は実験値を説明で

きる。このことは，理論において水路床勾配，雪の見かけの密度，摩擦係数などを厳密に考慮したことの有効性が示されたものといえる。一方，流量が小さい範囲では雪塊の移動限界の実測値は理論値に比べてやや小さい。これは，単一の雪塊の移動と比べて，雪塊を断続的に投入した場合では上下流の雪塊の影響を受け，移動の形態が変化するためであろう。小さい雪塊では相対的に水深変化の度合いが大きいため，この影響が大きくなっ

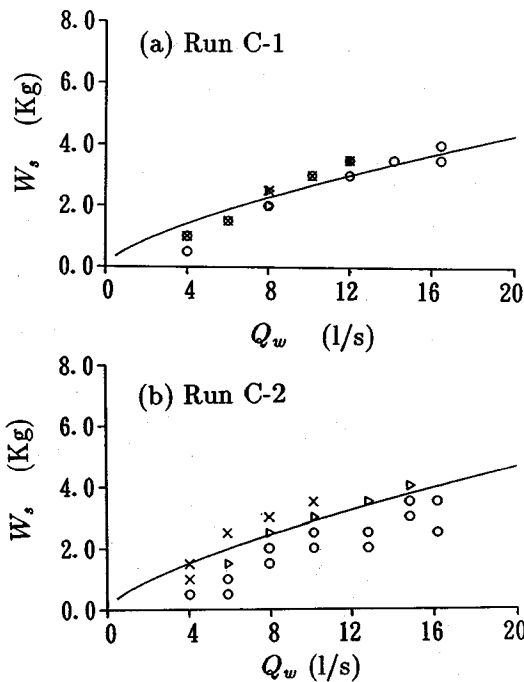


図-10 単一の雪塊の移動限界 (Channel C)

たものとする。

図-10はChannel Cで行った実験結果である。この図の縦軸、横軸は図-9と同様である。図-10(a), (b)はいずれも底面の材質はペンキで塗装したものであり、水路床勾配は1/1 000の一種類である。これらの図では実験値のばらつきはきわめて小さく、理論値を表す実線は投入した雪の移動を表す○印と移動しなかった×印の中間に位置する。

以上のように、ここで提案した移動限界式は、密度で表される雪質、水路床勾配、底面の状態などをパラメータとして流量の関数として表すことができた。このような解析によって、これらのパラメータを適切に評価することができれば、広い範囲の条件に対し理論により雪輸送限界を見積もることが可能になる。すなわち、与えられた流量に対し、適切な1回の投雪量、すなわち、スノーダンプまたはスコップでの投雪量の最大値を求めることができよう。

4. 結 論

本研究は、直線の流雪溝における雪塊の移動限界を中心に理論的・実験的研究を行った。理論は、流雪溝に置かれた雪塊に作用する力として、重力、浮力の斜面方向

成分、底面との摩擦力、雪塊に働く抗力、雪塊の上・下流の圧力差を考慮したものである。また、この理論の妥当性を検討するため、雪塊と模擬雪塊を用いた実験を行った。Channel Aの実験は単一の雪塊あるいは模擬雪塊としての木片を用いたものであり、この結果は理論により適切に表現できた。Channel B, Channel Cの実験は実際の流雪溝を想定していくつかの雪塊を断続して投入した実験であり、一回に流すことができる雪の重量を求めることができる。以上のようにさまざまな水力条件と雪塊の条件に対して行った実験結果は理論式で説明することができ、その妥当性が検証された。

一方、本論文で提案した雪塊の輸送限界の理論式は直線水路を対象とした場合であり、水路の曲がり、分岐、合流などの影響はすべて無視されている。これらは流雪溝の流雪能力に対して大きな影響を及ぼす。これらについては、今後の課題としたい。

最後に、本研究は長岡技術科学大学技術開発センタープロジェクト「市街地のための除排雪機器の開発と除排雪システムの設計法」の一環として行われた。プロジェクトに参加された、日本ブルカン(株)、(株)新潟鉄工所、(株)荏原製作所、(株)佐藤工業、(株)アルゴスの各社に感謝の意を表します。また、実験を行うにあたり本学校卒業生の岡村康一、西川淳の両氏に助力を得た、ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 建設省北陸建設局監修：流雪溝設計運営要領，北陸建設弘済会，1983。
- 2) 高橋博・中村勉：雪氷防災・白亜書房，pp.179～193，1986。
- 3) 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II部，土木学会，pp.534～535，1990。
- 4) 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，第27巻，pp.801～806，1983。
- 5) 福嶋祐介・早川典生・吉永一義・岡村康一：流雪溝の最大流雪能力と水深増加率に関する水理学的検討，雪氷，第53巻，第4号，pp.297～307，1991。
- 6) 福嶋祐介・早川典生・岡村康一・村上正人：流雪溝の雪輸送能力に関する水理学的検討，水工学論文集，第36巻，pp.287～291，1992。
- 7) 大熊孝・大川秀雄，神立秀明・宮拓男・水落直人・中村一郎：流雪溝と消融雪溝の標準的計画設計法に関する基礎的研究，雪氷，第50巻，第4号，pp.239～251，1989。
- 8) 荒木正夫・椿東一郎：水理学演習下巻，森北出版，p.81，1962。

(1993.7.28 受付)

CRITICAL CONDITION FOR MOVEMENT OF SNOW CHUNKS IN AN OPEN CHANNEL

Yusuke FUKUSHIMA, Norio HAYAKAWA and Masato MURAKAMI

Critical condition that snow can move or not in an open channel flow is investigated theoretically and experimentally. A theory of snow movement conditions is derived from force balance of large snow chunks for flow direction. In order to compare with the theory, the experiments are carried out for several snow conditions and hydraulic conditions. The theory can predict the movement of several size of snow chunks under several bed slopes and surface materials of the bed.
