

流雪溝の設計流量について

A Scheme Discharge of Snow Drain Channel

八戸工業大学 正会員 佐々木幹夫
八戸工業大学 正会員 西 田修三

1. はじめに

近年、積雪寒冷地での流雪溝布設が増加の傾向にある。流雪溝は雪を運ぶベルトコンベアーと呼ばれるように流水の運搬能力によって雪を流末まで流送する輸送施設であり、この布設は雪捨場を街区の中に確保することを意味する。しかし、水路の条件が悪かったりすると溢水が起き、対策に苦慮することになる。気温の低下の著しい北海道および東北の北部などでは溢水は許されず、これを避けることが設計の第一条件となる。流雪溝に関する研究は梅村(1963)¹⁾、片山(1965)²⁾、など過去にも実用的なものはあるが、水路内の流雪機構に関する研究は少なく、近年、佐藤・首藤(1983)³⁾の研究があるだけで、まだ不明な点が多い。

水路内の流雪現象に関連する因子は、(1)水路の条件(勾配、内幅、内高)、(2)雪質(雪塊の大きさ、密度)、(3)自然条件(雪温、水温、気温)、(4)投入条件(雪塊投入速度、雪塊浮遊率)であるが、本研究ではこれら因子のうち、(1)(2)(4)の関連を雪塊による水路閉塞寸前の状態で考えてみることにする。すなわち、流雪溝内の限界状態の雪流を塑性流動・ビンガム性の流れとみなし、平均流速を求め、限界状態の条件より設計流量を明らかにしてみる。

2. ビンガム流性の雪水混相流

2. 1 モデル流体のあてはめ

佐藤・首藤(1983)³⁾のように溝内のほとんどを占める大きさの雪塊を考えると雪塊部分の速度変化はなく、ビンガム性の流れとして取り扱えることになるが、ここでは、種々の大きさの雪塊が混じっている雪流を考える。この流れをどのようなモデル流体で表すかを泥流の研究よりみると以下のようになる。山岡他(1980)⁴⁾、藤田他(1981)⁵⁾によると、流動性 $R_{ed} = U_* k_s / \nu_d$ 、ここに、 $U_* = \sqrt{g h \sin \theta}$ 、 g = 重力加速度、 h = 水深、 k_s = 路床粗度、 $\sin \theta$ = 水面勾配、 ν_d = 動粘性係数、により区分でき、流雪溝の場合、 $k_s = 2 \times 10^{-3} m$ 、 $\sin \theta = 1/500 \sim 1/100$ 、 $h = 0.5 \sim 0.7 m$ 、 $\nu_d = 1.8 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4} m^2/s$ 、 $R_{ed} = 2.2 \sim 22$ となり、 $R_{ed} < 60$ ビンガム流、 $R_{ed} > 60$ ダイレタント流であるから溝内雪流はビンガム流ということになる。また、通常的水路では雪塊が上下入り乱れながら流下することは見られないから雪流はダイレタント流体よりはビンガム流体ということになる。ビンガム流動ではせん断力を次のように表わせる

$$\tau - \tau_c = \mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 τ : 任意点において流体に働くせん断力、
 τ_0 : 壁面におけるせん断力、 τ_c : 流動性を生ずる
限界の τ 、 x : 壁面からの距離、 μ : 粘性係数、
 u : 任意点流速である。

2. 2 平均流速式

排雪限界に近い状態で流雪溝の使用がなされているものとし、溝内中央の雪塊は同一速度で流下している場合を考える。通常流雪溝では水深と水路幅が同一程度であるから側壁の影響は無視できない。

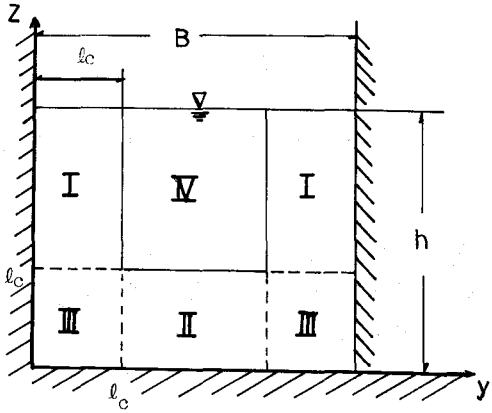


図-1 長方形水路断面の区分

この場合、流れを Fig. 1 のように4つの領域に区分できる。領域Ⅰは側壁面のみが、Ⅱは底面、Ⅲは側面と底面が流れに影響し、これらの領域にない壁面は影響しないものとする。領域Ⅳは同一速度で流下する栓流の領域で、 $\tau = \tau_0$ の値がそのまま伝達されている。任意点におけるせん断力を、壁面せん断力が τ_0 のとき、次のような直線分布で表せるものと仮定する。

$$\tau = \frac{l - x}{l} \cdot \tau_0 \quad \dots \quad (2) \quad \text{ただし、} l = \begin{cases} B/2 & (B/2 < h) \\ h & (B/2 > h) \end{cases} \quad \dots \quad (3)$$

$$\tau = \frac{l - l_c}{l} \cdot \tau_0 \quad \dots \quad (4)$$

ここで、 l_c は壁面から降伏値発生点までの距離である。

式 (1)、(2)により領域Ⅰ、Ⅱにおける流速は、壁面で $u = 0$ の境界条件を満足するように、

$$u_I = \frac{l \tau_0}{\mu} \left(l_c^* - \frac{\eta}{2} \right) \eta \quad \dots \quad (4) \quad \text{ただし、} l_c^* = \frac{l_c}{l} \quad \dots \quad (5), \quad \eta = \frac{y}{l} \quad \dots \quad (6)$$

$$u_{II} = \frac{l \tau_0}{\mu} \left(l_c^* - \frac{\xi}{2} \right) \xi \quad \dots \quad (7) \quad \text{ただし、} \xi = \frac{z}{l} \quad \dots \quad (8)$$

となり、 $z = y = l_c$ においては、式 (4)、(7)を用いて、

$$u_c = \frac{l l_c^* \tau_0}{2 \mu} \quad \dots \quad (9)$$

となり、これが領域Ⅳ、すなわち、plug flow の速さであり、水路中央の表面流速である。

領域Ⅲにおける流速は式(4)、(7)より

$$u_{III} = K \left(l_c^* - \frac{\eta}{2} \right) \eta \left(l_c^* - \frac{\xi}{2} \right) \xi \quad \dots \quad (10)$$

とおき、 $y = l_c$ の線上において、 $u_{III} = u_{II}$ 、 $z = l_c$ にて $u_{III} = u_I$ となるように置くと、

$$K = \frac{2 l \tau_0}{l_c^* \mu} \quad \dots \quad (11) \quad \text{ゆえに、} u = \frac{2 l \tau_0}{l_c^* \mu} \left(l_c^* - \frac{\eta}{2} \right) \eta \left(l_c^* - \frac{\xi}{2} \right) \xi \quad \dots \quad (12)$$

を得、これは、点 $(y, z) = (l_c, l_c)$ においてはせん断降伏値 $\tau = \tau_c$ を与える。式 (12) より式(1)を用いて、領域Ⅲの壁面せん断力を求めると $y = z = 0$ において、 $\tau = \tau_c$ 、 $z, y = l_c$ において、 $\tau = \tau_0$ となるような放物線分布が求まる。したがって、水路全断面の壁面せん断力の平均値 $\bar{\tau}_0$ は

$$\bar{\tau}_0 = \tau_0 \alpha \quad \dots \quad (13)$$

$$\text{ここに} \quad \alpha = \{2(h - l_c) + B - 2 l_c + \frac{8}{3} l l_c^* + 4(1 - l_c^*) l_c\} / (2h + B) \quad \dots \quad (14)$$

となり、 τ_0 は流体の密度を ρ 、径深を R 、水面勾配を I としたとき、式(15)のように表すことができる。

$$\tau_0 = \rho g R I \cdots \cdots (15) \quad \text{ここに} \quad R = Bh / (2h + B)$$

故に、 $\tau_0 = \rho g R I / \alpha \cdots \cdots (16)$

水路の幅が広い場合には、式(3)より $l = h$ となり、流速分布は式(7)、(8)で表せ、式(14)で与えられる α は $h/B \ll 1$ より $\alpha = 1$ となる。

したがって、平均流速は、流量 Q が、

$$\begin{aligned} Q &= 2 \int_I (h - l_c) u_I dy + \int_{II} (B - 2l_c) u_I dz + 2 \int_{III} u_{III} dy dz + u_c (B - 2l_c) (h - l_c) \\ &= \frac{l l_c^2 \tau_0}{\mu} \left\{ \frac{2}{3} h l \left(1 - \frac{l}{h} l_c^*\right) l_c^* + \frac{1}{3} B l \left(1 - 2 \frac{l}{B} l_c^*\right) l_c^* \right. \\ &\quad \left. + \frac{4}{9} l^2 l_c^{*2} + \frac{1}{2} B h \left(1 - 2 \frac{l}{B} l_c^*\right) \left(1 - \frac{l}{h} l_c^*\right) \right\} \cdots \cdots (17) \end{aligned}$$

となるので、結局

$$u_m = \frac{l l_c^2 \tau_0}{\mu} F_1 \cdots \cdots (18)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{2}{3} \frac{h}{B} \frac{l}{h} \left(1 - \frac{l}{h} l_c^*\right) l_c^* + \frac{1}{3} \frac{l}{h} \left(1 - 2 \frac{l}{B} l_c^*\right) l_c^* \\ &\quad + \frac{4}{9} \frac{l}{B} \frac{l}{h} l_c^{*2} + \frac{1}{2} \left(1 - 2 \frac{l}{B} l_c^*\right) \left(1 - \frac{l}{h} l_c^*\right) \} \cdots \cdots (19) \end{aligned}$$

なる形で表されることになる。広幅水路の場合には $l/B \ll 1$ であるから、 F_1 は次のようになる。

$$F_1 = \frac{1}{6} (3 - l_c^*) \cdots \cdots (20)$$

$$\therefore u_m = \frac{h \tau_0 l_c^2 (3 - l_c^*)}{6 \mu} \cdots \cdots (21)$$

3. 排雪限界

3. 1 投雪限界と限界状態

ここに、投雪限界とは、ある一定の流量で流し得る最大の雪量 q_s を投入している状態をいい、限界状態とは最大の雪量が流下している雪流現象で、水路閉塞寸前の極限状態をいい、排雪限界とは投雪および流送全体の極限状態を指すこととする。排雪限界に近づける過程において、(1)雪塊の流入により水位が上昇し、(2)水位上昇により流速が増え、(3)溶積濃度の増分により流速が下がる、以上3つの状態が考えられる。いま(2)および(3)の相互作用により、流速を増やすことなく、排雪限界に入ることができたとする。この状態において、水路の閉塞は混相流の平均流速が投雪前の平均流速を下回るような溶積濃度の増分が加えられたときから始まるものと考えることができる。したがって、限界状態の流速より、流雪溝は、初期流水速度を u_0 。として

$$u_m \geq u_0 \cdots \cdots (21) \quad \text{ここに、} \quad u_0 = \frac{1}{n} R_0^{2/3} I^{1/2} \cdots \cdots (22)$$

としておくことで良い。ここで、 n はマンニングの粗度係数、 R_0 は雪塊のない状態の深径である。式(21)

を用いて設計流量Qを定めるには、 μ と ℓ_c^* がわかれば良いことになる。

3. 2 粘度式

雪水混相流に関連するような粘度式をあげると表1のようになる。サスペンションの場合では、式(24)は粒子径の分布が広いとき、式(25)は粒子が比較的そろっているときに良く合う⁶⁾。谷口は⁷⁾泥流の場合、式(26)は低濃度の場合にのみ合うことを明らかにしている。彼の実験に良く合う式(26)のCは28付近にあり、式(23)のKが粘土の場合には、 $K=22.5$ ⁶⁾であるからおおよその一致はみられる。藤田らの泥流の実験では、 $C=153$ と大きく、Cの値は物質によって異なるようである。式(25)、(26)の定数0.74、0.52は最密充填および最疎充填の溶積濃度であり、雪の比重が大きい場合には後者、比較的小さい場合には前者の値になるものと考えられる。

山岡ら(1981)⁴⁾は式(26)の比粘度を用いて ℓ_c^* を実験値でみた場合、次に示すような式がよい適合を与えている。

$$\ell_c^{*2}(3-\ell_c^*)=0.24\{(\frac{0.52}{\phi})^{1/3}-1\} \dots\dots\dots (27)$$

一方、佐藤・首藤のように、大きな雪塊を考えると、降伏値は雪塊表面で発生するから、 ℓ_c^* は

$$\ell \propto 1-\phi \dots\dots\dots (28)$$

で与えられる。式(27)を式(24)、(25)の考え方に合わせて山岡らの実験値に照合すると ℓ_c^* に関する式として次式を得る

$$\ell_c^{*2}(3-\ell_c^*)=0.076(2+\phi/0.74)(1-\phi/0.74)^2 \dots\dots\dots (29)$$

$$\ell_c^{*2}(3-\ell_c^*)=0.044(2+\phi)(1-\phi)^2 \dots\dots\dots (30)$$

3. 3 排雪限界の流量

投雪比r(= q_s/Q 、 q_s =投雪量、 Q =流水量)は溶積濃度 ϕ と

$$r = \frac{\phi}{1-\phi} \qquad \phi = \frac{r}{1+r} \dots\dots\dots (31)$$

なる関係があるから、投雪前の水深を h_0 。雪の比重を σ とするととき、水深hは

$$h=h_0(1+\sigma r) \qquad h=h_0(1+\sigma \frac{\phi}{1-\phi}) \dots\dots\dots (32)$$

となる。雪のない状態の平均流速 u_0 は、

表1 粘度式

	比粘度 $\mu_r = \mu/\mu_w$ μ_w: 水の粘性係数 ϕ: 溶積濃度	
Einstein (1911)	$1+K\phi$, $K=2.5$	(23)
Brinkman (1952)	$(1-\phi)^{-2.5}$	(24)
Roscoe (1950)	$(1-\phi/0.74)^{-2.5}$	(25)
森・乙竹 (1956)	$1+\frac{C}{1/\phi-1/0.52}$	(26)
	$C=3$	

$$u_0 = (2 g R_0 I / f)^{1/2} \quad \text{ここに} \quad f = 2 g n^2 / R_0^{1/3} \dots \dots \dots (33)$$

で表わされるから、限界状態の式(21)より、流雪溝の安定条件は次のようになる。

$$F - 1 = 0 \dots \dots \dots (34)$$

$$F = \left(\frac{f}{2}\right)^{1/2} S_r \frac{h_0 (g h_0 I)^{1/2}}{\nu_w} \frac{\ell}{h_0} \left(\frac{R}{h_0}\right)^{1/2} \left(\frac{R}{R_0}\right)^{1/2} \frac{F_1 \ell^2}{\alpha} \mu_r \dots \dots \dots (35)$$

ここに、 S_r は混相流体の比重、 ν_w は水の粘性係数である。上式(34)の μ_r は表1に示した比粘度、 ℓ は式(27)、(29)および(30)のいずれかで与えられ、どの粘度式モデルを採用するかで用いる式が決まてこよう。

4. 結果と考察

表2は倶知安、黒石両流雪溝の実測結果と著者らの理論を比較したもので、黒石流雪溝は測定期間中の最大日降雪量38cmの雪を35分で地区住民が排雪した場合で、文字どおり期間中最大の投雪量となっており実質的な排雪限界にあったのではなかったと思われる。

表 2 実測と理論の比較

α: 日降雪量								
実 測								理 論
	B m	i	Q m ³ /s	v m/s	h ₀ m	τ _m	r	r ₁ (式(24))
倶知安流雪溝	No.1	0.6	1/500	0.26	1.225	0.363	0.13	0.516
	No.2	0.6	1/500	0.249	1.185	0.356	0.14	0.445
	No.3	0.6	1/500	0.231	1.205	0.323	0.11	0.528
	No.4	0.6	1/500	0.243	1.205	0.350	0.19	0.760
	No.5	0.6	1/500	0.204	1.150	0.308	0.10	0.708
黒石流雪溝	横町上町	0.5	1/105	0.160	2.130	0.150		1.540
	元町	0.5	1/105	0.160		0.150		1.640
								r ₂ (式(25))
								n=0.013
								Sr=1.0 σ=0.3 として計算

倶知安流雪溝の場合には多いときで19cmの日降雪量で、幅18m、延長500mの雪を処理している。表2より黒石流雪溝は理論値の倍近くなっているが、倶知安流雪溝の場合は理論値の近くにある。雪質は倶知安流雪溝のNo.4がべた雪で、あとはすべてこな雪、黒石流雪溝はべた雪(推定)である。べた雪の場合に理論値より大きくなる傾向にある。とくに黒石流雪溝の場合には大きい値になっているが、投雪比が2付近になったとの報告もあり、投雪時の雪質を正確に知る必要がある。倶知安流雪溝が排雪限界に達していなかったとすれば、理論は低い投雪比rの排雪限界を与えることになる。

図-2, 3は式(34)より投雪比rを計算した一例で、雪塊の比重によって投雪比がどう変わるかを示したのが図-2である。図-2よりσの増大に伴い、

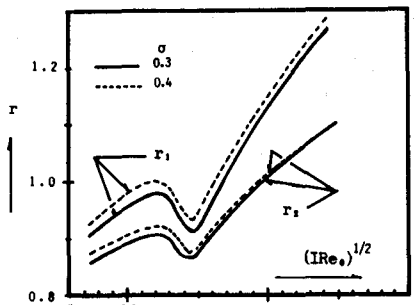


図-2 σとrの関係 (I=1/100, B=0.6m)

r も大きくなる傾向がある。図-2 において、 $h = 30\text{ cm}$ 付近を境にして、傾きが異なるのは、式 (3) に由来する、すなわち式 (3) で定義したように、流体内部のせん断力分布の傾きが $B/2$ と h の小さい方に関係するからで、この点モデルの改善の余地があり得る。図-3 は水路幅 $B = 0.5\text{ m}$ の水路の場合について、投雪比を計算したもので、勾配の大きい方が大きい r を与える傾向にある。

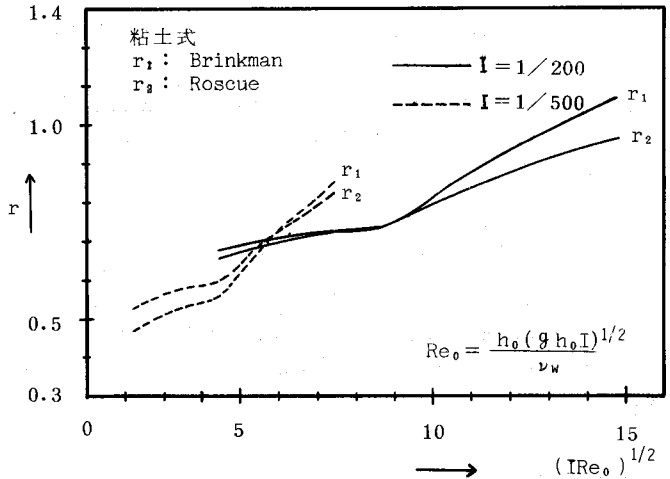


図-3 投雪比と Re_0 の関係 ($B = 0.5\text{ m}$ の場合)

5. おわりに

流雪溝の雪水混相流を山岡らの泥流

の流動性状区分に従い、ビンガム流体とし、平均流速を求め、排雪限界の定義づけのもとに、投雪比を与える式を提案した。実測値の大きな値では r が 2 程度になるとの報告があるが、本理論ではこのような大きな値は説明できなかった。ビンガム流動の場合、壁面からせん断降伏値発生地点までの距離 l_c^* と粘性係数 μ の 2 つが未知数になるが、本理論では l_c^* を山岡らの泥流の実験値 (レイノルズ数の小さい実験値) より決め、粘性係数は Brinkman か Roscoe の粘度式で与えた。谷口の粘土の泥流実験値から判断すると、粘性係数は $\log \mu$ と ϕ の比例関係にあり、エマルジョンの粘性係数に対応しており、本理論で採用した粘度式の傾向と異なる。限界状態を論ずるのであれば、最終濃度が強く関係するので、ここに示した投雪比を大きく変えることはないと思われる。

参考文献

- 1) 梅村弘：俱知安駅構内流雪溝の新設、鉄道土木、5-2、1963.
- 2) 片山降憲：スノーメルターを併置した流雪溝 (上、下)、鉄道土木、12-1・2、1970.
：流雪溝、鉄道土木、7-6、1965.
- 3) 佐藤敏之、首藤伸夫：雪混り流水の抵抗法則、第27回水講演文集、pp. 801、1983.
- 4) 山岡勲、長谷川和夫、渡辺隆：流路内の泥流流速に関する実験的研究、土木学会北海道支部論文集、pp. 225、1980.
- 5) 藤田睦博、その他3名：微細粒子に富む泥流の流速分布とモデル流体のあてはめ、土木学会北海道支部論文集、pp. 267、1981.
- 6) 花井哲也、その他2名：レオロジーとその応用、共立出版、第10章.
- 7) 谷口信義：土石流の基礎的研究——主として泥漿流の流動学的解析——、宮崎大学農学部演習林報告第7号、pp. 1~85、昭49.3 (1974).