

模擬雪塊及び実雪塊を用いた流雪溝 の実験的検討

福嶋祐介¹・早川典生²・新谷武史³

¹正会員 工博 長岡技術科学大学 教授 工学部環境・建設系 (〒 940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

²正会員 Ph.D 長岡技術科学大学 教授 工学部環境・建設系 (同上)

³正会員 工修 京都府 (〒 602-70 京都市上京区下立売新町西敷ノ内町)

先に発表した、流雪溝中で完全浮遊する雪塊の流動に関する理論と比較するため、実験を行った。雪塊が浮遊する条件での流速分布を測定するため、プラスチックボールを雪塊(これを模擬雪塊と呼ぶ)に見立てた模擬実験を行った。この結果、水層での流速分布が対数則に従うこと、模擬雪の流下速度は水層の最大流速より僅かに小さいことなどの流動特性が明らかになった。その他、流雪量、雪投入に伴う水深増加について、模擬雪と実際の雪を用いて実験を行い、理論式との比較を行った。流雪量・流水量比、雪投入に伴う水深増加などの実験値が理論式で説明できることを明らかにした。

Key Words : snow removal, open channel flow, model experiments

1. はじめに

流雪溝は水流の作用により、投入された雪を押し流す施設である。このため、流雪溝はこれまで水流の流速が大きくとれる急傾斜地を中心として普及してきた。また、流雪溝の特性として水路内での凍結は機能の妨げになる。このため、流雪溝は冬季に比較的温暖な多雪地帯である本州日本海側を中心として有効な除排雪施設として普及している^{1),2)}。流雪溝の概念図を図-1に示す。屋根雪や道路上の積雪を人力あるいは除雪機械などにより、流雪溝に投入すると水流の力によって雪を流すことができる。

これまでの流雪溝の研究は主として実験的に行われてきた(建設省北陸地方建設局¹⁾、土屋・宮岸⁵⁾、大熊ほか^{3),4)}、福嶋ほか^{7),8)})。これに対し、流雪溝による雪輸送についての理論研究もいくつかある。佐藤・首藤⁶⁾は、雪水混相流がビンガム流体であり、渦動粘性係数が一定であると仮定し、流速が放物線分布をなすことを示した。

流雪溝の運営を円滑的に行い、その能力を効果的に引き出すためには、直線部での流雪溝内の雪塊の運動を把握し、投雪を行う必要がある。特に、平坦部での流雪溝では、投入した雪は浮遊して運動する。福嶋⁹⁾は、このような流雪溝の流動機構を解明するため、理論的な解析を行った。そこでも理論と実験値とが比較されているが、実験では必ずしも完全な浮遊状態の条件のものばかりではなかった。特に理論的な考察の基本である、雪・水混相流がビンガム流体であるとの仮定を行っ

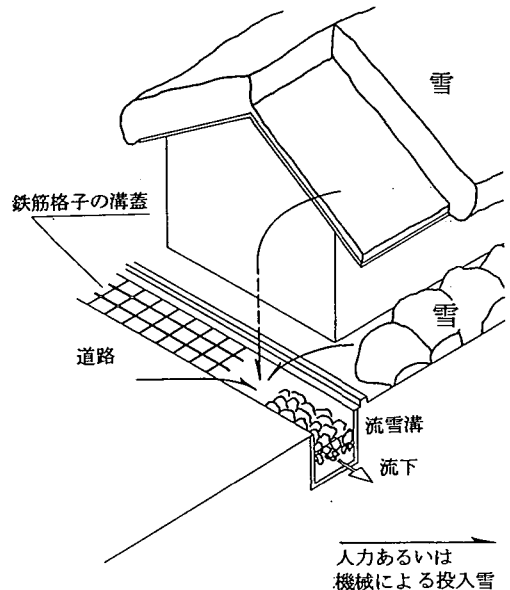


図-1 流雪溝

ているが、その妥当性は十分には検討されていない。

本論文では、模擬雪塊としてプラスチックボールを用い、これらが開水路中を流下するときの流速分布、水深増加率、流雪・流水量などを測定する。この結果を理論値と比較し、直接的に完全浮遊の条件下での雪輸送能力について検討を行う。さらに実際の雪を用いて、与えられた流水量に対する流雪量を測定し、模擬雪塊による実験結果と比較する。

模擬雪塊を用いて流雪溝内の流動特性を把握することの利点は以下のものである。水路内の水と雪との温度差による融雪効果を見捨てる。水の吸水による密度変化がない。雪がない時期での実験が可能である。このことにより、融雪、吸水の影響を受けずに、無雪時に何回もの実験を精度よく多数行うことができる。

一方、模擬雪塊を用いることの欠点は以下のものである。プラスチックボールは雪と違い吸着効果がないため、バラバラになって流下し、模擬雪層の厚さがボールの直径で決まってしまう。複雑な形状をもつ実際の雪に対し、形状が単純である。以上の欠点を補うため、実際の雪塊を用いた実験をも行うことにより、模擬雪塊と実際の雪塊との流動特性の差を十分に考慮することが重要である。

2. 実験装置と実験方法

流雪溝の側面図と断面図を図-2に示す。図(a)において、全水深を h 、雪層の厚さを h_s 、水中部分の雪層の厚さを h_0 、空気中の雪層の厚さを h_2 、水層の厚さを h_1 とする。また、図-2(b)の断面図において、水路幅を B 、雪層の幅を B_s とする。流雪溝内の流速分布の測定に用いた実験装置を図-3に示す。水路は幅 $B = 0.4\text{m}$ 、長さ $L = 11.0\text{m}$ であり、側面がガラス板、底面が鉄板よりなる可変勾配水路である。流量は水路上流端に設置した三角堰での越流水深を測定することによって得られる。

(a) 流速分布の測定

前述のように流雪溝内で雪が完全浮遊の状態で行流れる場合の流速分布を知ることは流雪量を知るために重要である。一方、このような流れでは上部に模擬雪塊が流れるため、プロベラ流速計、水素気泡法等の流速測定法を用いることはできない。そこで、今回の測定では、トレーサー法を採用した。トレーサーとして湿した「おがくず」を水路中に投入し、これを図-3に示した位置でビデオ撮影を行い、ストップモーションアナライザーでトレーサー位置の時間変化を測定し、流速分布を測定した。トレーサーとした「おがくず」は、なるべく水路中央に投入し水路壁面の粗度の影響を受けないようにした。

(b) 模擬雪塊の流速

模擬雪塊の流速は、水路上方からプラスチックボールの運動をビデオ撮影を行うことにより求めた。

実験の手順は次のようである。あらかじめ計量した模擬雪塊をベルトコンベアーに載せる。所定の流量にセットする。水路内の水位が安定したら、模擬雪塊(あるいは実際の雪)投入前の水深を測定する。ベルトコンベアーのスイッチを入れ、雪塊の投入時間を測定す

表 - 1 模擬雪 (プラスチックボール) の特性

item	diameter d_s (cm)	volume V_s (cm ³)	weight W_s (g)	density ρ_s (g/cm ³)
	2.6	9.2	8.28	0.90

表 - 2 流速測定のための実験条件

Run No.	slope I	water discharge Q_w (l/s)	initial depth h (cm)	snow discharge Q_s (l/s)
1	1/1000	15.0	6.7	0.91
2	1/1000	15.0	6.7	3.36
3	1/1000	5.0	3.5	3.25
4	1/1000	15.0	6.7	2.91

る。指示者の合図に従って、図-3に示す位置からトレーサーを水路に投入し、側面あるいは上部からビデオ撮影する。

実験条件は以下の通りである。流速分布及び模擬雪塊の速度の測定実験では、水深を大きくとれることを主眼において、水路床勾配 I を1/1000とし、流量を15.0l/sとした。このとき、模擬雪塊投入前の水深は $h = 6.7\text{cm}$ であった。

模擬雪塊の諸元を表-1に、流速分布測定時の実験条件を表-2に示す。ここで、Run 1とRun 2は水層の流速分布と雪層の流下速度の測定を対象とした場合の実験条件であり、Run 3とRun 4は雪層の速度のみを対象とした場合の実験条件である。

3. 水層の流速分布と雪層の流速の測定結果

水層の流速分布と雪層の速度の測定結果を図-4(a)、(b)に示す。雪層の流下速度の測定結果を図-5(a)、(b)に示す。

図-4は、縦軸に底面からの距離 z (cm)を横軸に流速 u (cm/s)をとり疑似雪塊が浮遊して輸送される場合の流速分布を示したものである。ここで◆印は流速の測定値、実線は測定値を対数近似曲線で表したものの、大きな楕円は模擬雪塊の移動速度である。図-4(a)はRun 1で模擬雪塊投入後の水深は $h = 6.9\text{cm}$ 、 $h_1 = 5.2\text{cm}$ 、(b)はRun 2で雪塊投入後の水深は $h = 7.7\text{cm}$ 、 $h_1 = 5.7\text{cm}$ で、模擬雪投入前の水深はいずれも6.7cmであった。模擬雪の投入量が少ないRun 1とRun 2の投入後の水深を比較すると、投入量の多いRun 2の方が水深の増加が大きい。すなわち、模擬雪を多く投入した

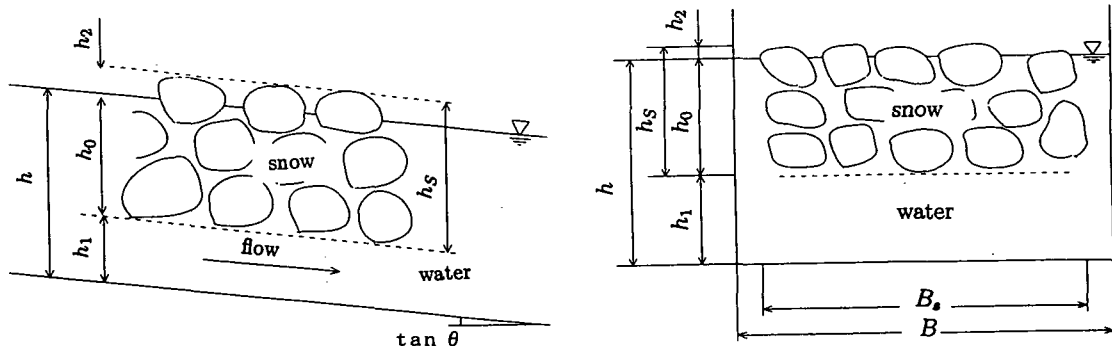


図 - 2 流雪溝の側面図と断面図

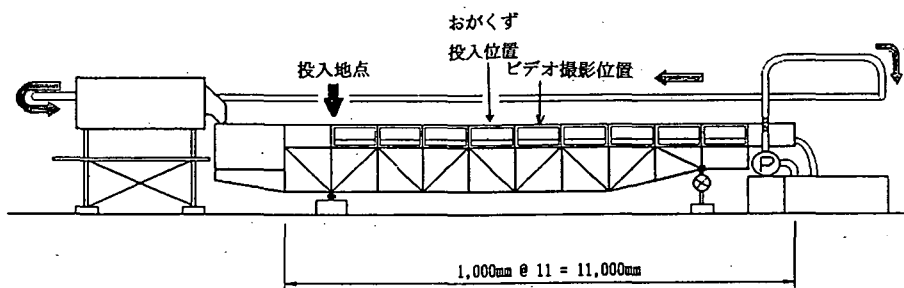


図 - 3 実験装置 No.1

Run 2 では Run 1 に比べて見かけの抵抗が大きくなっていることを示す実測結果となった。

一点鎖線は福嶋⁹⁾の理論式を滑面の条件に基づき書き直した式であり、次式で表される。

$$u(z) = u_{*1} \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_{*1} z}{\nu} + A_s \right) \quad (1)$$

ここで、 κ はカルマン定数、 A_s は粗面对数則での実験定数である。 u_{*1} は、水層の厚さ h_1 に基づいた摩擦速度であり次式で表される。

$$u_{*1} = (gh_1 \sin \theta)^{1/2} \quad (2)$$

点線は模擬雪塊を流さなかった場合の流速分布を対数則で示したものであり、次式である。

$$u_0(z) = u_* \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* z}{\nu} + A_s \right) \quad (3)$$

ここで、 u_* は雪投入前の水深 h に基づく、摩擦速度であり次式で表される。

$$u_* = (gh \sin \theta)^{1/2} \quad (4)$$

ここで ν は動粘性係数、定数 $A_s = 8.5$ とした。Run 1 と Run 2 では模擬雪投入前の水理条件が等しいが、式(3)を適用するに当たって、水深の値を実測値で与えているので、破線の対数分布則が Run 1 と Run 2 でわずかに異なる結果となった。

雪水混相流をビンガム流体と仮定したことによる影響は流速分布に表れる。すなわち、ビンガム流体として

得られた流速分布式(1)には、摩擦速度 u_{*1} が含まれている。この摩擦速度は式(2)で全水深 h の代わりに、雪層を除いた水層の水深 h_1 を含む形で表されている。一方、ニュートン流体の仮定の下では式(3)、(4)に示されるように、摩擦速度は全水深 h で表される。当然のことながら $h_1 \leq h$ であるから、 $u_{*1} \leq u_*$ となり、雪塊を浮遊することによって流速が純水の場合よりも小さくなることが分かる。

図-4 (a)は模擬雪塊の投入量を減らした場合(Run 1, $Q_s = 0.91\text{l/s}$)である。また、(b)は模擬雪塊の投入量を最大にした場合(Run 2, $Q_s = 3.36\text{l/s}$)である。図-4 (a)と(b)を比較すると、雪の投入量を多くすることによって測定値は模擬雪塊が投入されない場合の流速分布図-4(a)から雪層がある場合の理論式(1)の流速分布図-4(b)に近づいてゆくのがわかる。

今回の実験では、ビデオ撮影の効率から水深を十分に大きくとつたため、模擬雪塊の投入量に限界があることから、流雪量と流水量の比、すなわち流水・流雪量比が $Q_s/Q_w = 0.2$ と小さくなっている。このため、流速分布の測定値が必ずしも理論式(1)で近似できるか否かは明確ではない。しかし、雪投入量の小さな図-4 (a)に比べて、雪投入量の大きな図-4 (b)の方が実験値と式(1)に近づいていることを考えると、雪投入量をさらに大きくした場合、雪水混合流のビンガム流体として

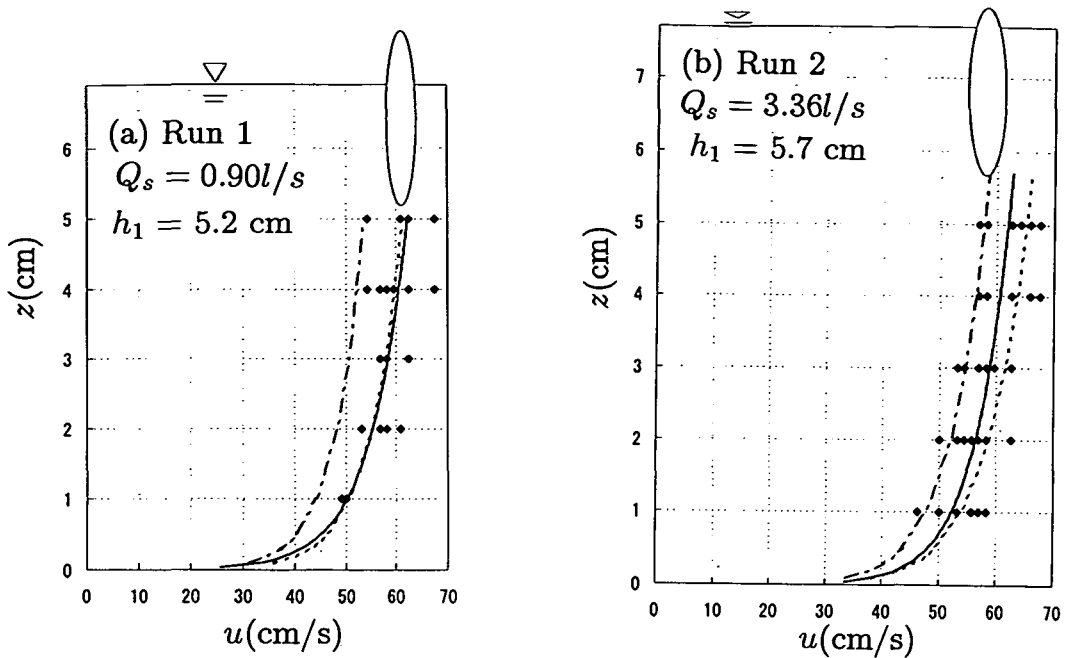


図 - 4 断面内の流速分布. (a) $Q_s=0.90$ l/s (b) $Q_s=3.36$ l/s.

の特性が顕著となり、上部の混合層の流速が一樣に近づく予想される。

図-5(a), (b)は、それぞれ、Run 3, Run 4の実験条件に対して得られた雪層の流下速度の時間変化を表したものである。縦軸は雪層の流下速度、横軸は雪塊投入後の経過時間である。破線は、次式で与えられる雪を投入する前の無雪時の表面流速 u_0 である。

$$u_0 = u_{*n} \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_{*n} h_n}{\nu} + A_s \right) \quad (5)$$

ただし、 h_n は無雪時の全水深、 u_{*n} は摩擦速度であり、次式で与えられる。

$$u_{*n} = (gh_n \sin \theta)^{1/2} \quad (6)$$

点線は、雪層の流下速度を表す次式である。

$$\frac{u_s}{u_{*1}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_{*1} h_1}{\nu} + A_s \quad (7)$$

ここで、 h_1 に基づく摩擦速度は式(2)で与えられる。

図-5(a), (b)から、どちらの実験条件でも、経過時間とともに雪層の流下速度は雪のない場合の等流状態の表面流速から式(7)の理論値に近づいてゆくのがわかる。図-5(a)では、流下速度の実験値が式(7)の理論値に比べ若干小さな値を示す。この理由としては、この実験条件(Run 3)では流雪流量比が $Q_s/Q_w=0.65$ であり、ほぼ最大流雪量の値となっており、このため模擬雪塊が水路内で停滞を起こしていた。この影響で模擬雪塊の流下速度が小さくなったものである。図-5(b)の条件(Run 4)では、図-5(a)に比べ、流雪量が比較的大き

く、流雪量が小さかったため、模擬雪塊は停滞することなく流下した。Run 4の条件では、式(7)による雪層の速度と式(5)による表面流速の差は小さいことが理論的に示されており、これが実験結果により裏付けられた。

4. 模擬雪塊による流雪能力と水深増加

流雪溝において、雪の閉塞に伴って水深が上昇し、溢水を生じると、単に流雪機能が停止するだけでなく付近の家屋などにも被害が及ぶ重大な問題となる。このためには流雪溝の雪処理効率を合理的に定めることが必要である。

緩勾配水路においては、急勾配水路に比べ同じ流量でも大きな水深を得ることができ、雪塊は底面に接して輸送されるよりも浮遊して輸送される場合のほうが多いと考えられる。そこで、本節では、雪塊が完全に浮遊して輸送される場合の最大流雪量(流雪能力)と雪投入に伴う水深の増加について実験を行い、福嶋⁹⁾の理論の妥当性を検討する。また、本実験においては、模擬雪塊としてプラスチックボールを用いた。

ここで用いた実験装置は図-3に示した可変勾配水路であり、2節で用いたものと同じである。模擬雪塊の投入は図-3に示す投入地点よりベルトコンベアーを用いて定期的投入した。雪投入に伴う水深変化はビデオ撮影することによって求めた。また、投入後の模擬雪塊の挙動、すなわち雪塊がどのように流下するか、

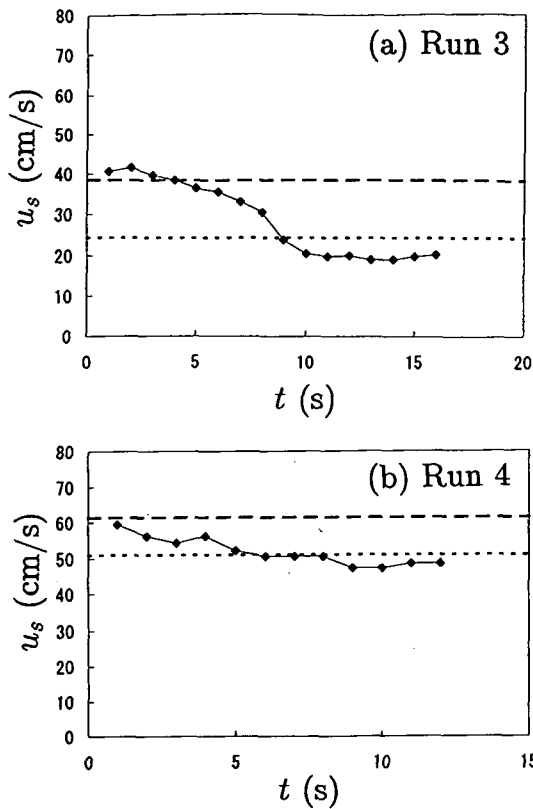


図 - 5 模擬雪の速度の時間変化. (a) Run 3 and (b) Run 4.

閉塞するか等を目視により観察した。実験に用いた模擬雪塊は前節で用いたものと同じであり、その諸元は表 - 1 に示す通りである。

実験条件は次の通りである。水路床勾配 I は雪塊が完全に浮遊するという条件を満たすため、 $I=1/500$, $1/1000$, $1/2000$ の3通りとした。流量はポンプの吐出能力及び作業性の観点から $2.5(l/s)$ から $15.0(l/s)$ の間の6流量とした。

今回の実験の模擬雪塊の流動特性はビデオ撮影、写真等の解析結果から以下ようになった。模擬雪塊は、水路幅いっぱい広がって流れた。また模擬雪塊は完全に浮遊して流れる場合には、はっきりと雪水混合層と水層に別れて流れた。閉塞する場合は、模擬雪塊投入場所で山積みになる。投入が終わると下流と上流の水位差による圧力差によって押し流される。

模擬雪塊による流雪量に関する実験結果の代表的なものを図 - 6, 図 - 7, 図 - 8 に示す。これらは順に、流量と流雪量の関係、流雪量流量比、雪輸送に伴う水深増加の三種類である。これらの図中において以下のような記号が用いられている。○印は模擬雪塊が浮遊して移動した場合、△印は模擬雪塊が底面に接して移

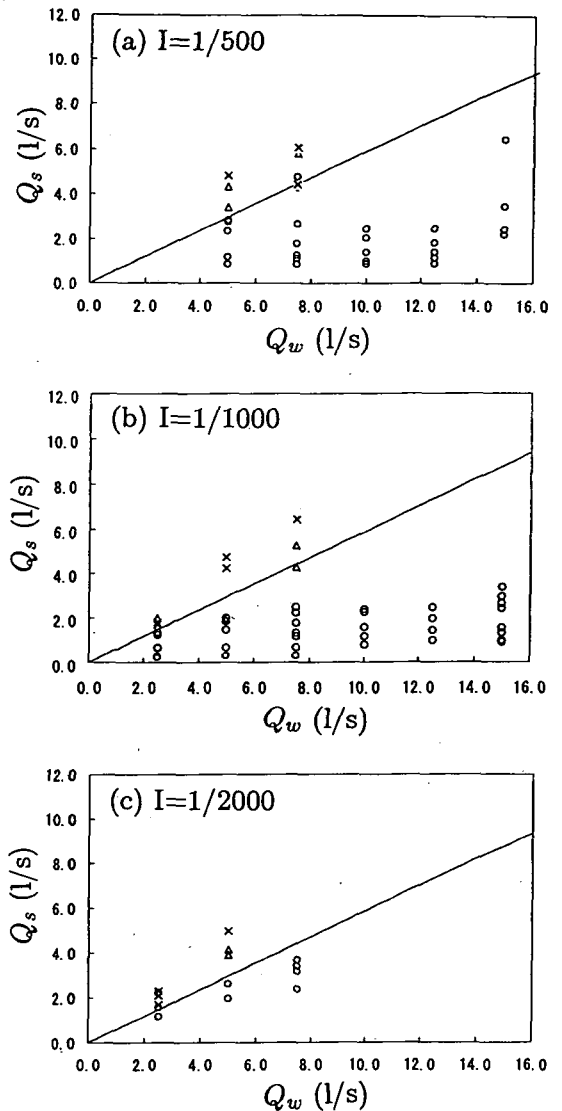


図 - 6 流量 Q_w と流雪量 Q_s の関係. (a) 水路床勾配 $I=1/500$, (b) $I=1/1000$ and (c) $I=1/2000$.

動した場合、×印は模擬雪塊が閉塞した場合を示している。

図 - 6 (a), (b), (c) は横軸に流量 Q_w 、縦軸に流雪量 Q_s をとり模擬雪塊の流下状況をプロットした図である。実線は、実験では模擬雪塊が水路幅全体として流れることを考慮し、 $b = (B - B_s)/2 = 0$ として求めた流雪量に関する理論式 (8) である。

$$Q_s = \frac{h_s \bar{u}_s}{\bar{u}_s (h_1 + h_0 \lambda) - \frac{1}{\kappa} h_1} Q_w \quad (8)$$

ここで、 h_s は空気中も含めた雪層の層厚、 λ は雪層の空隙率、 \bar{u}_s は次式で表される無次元流速である。

$$\bar{u}_s = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* h_1}{\nu} + Ar \quad (9)$$

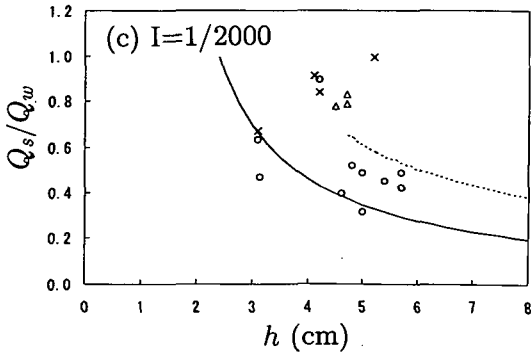
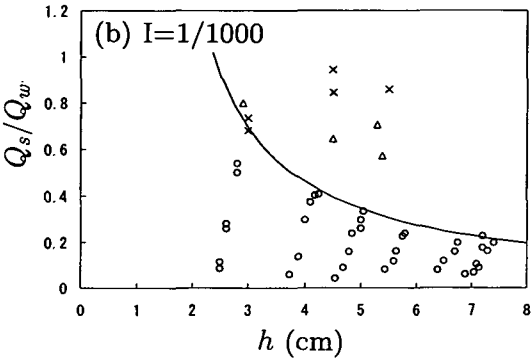
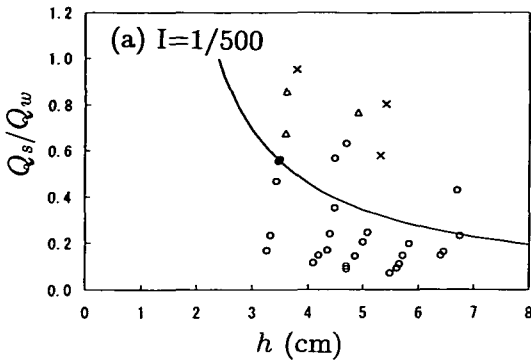


図-7 流雪・流水量比 Q_s/Q_w と水深 h の関係。水路床勾配 (a) $I=1/500$, (b) $I=1/1000$ and (c) $I=1/2000$ 。

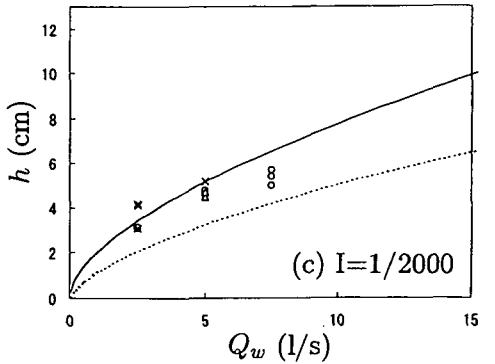
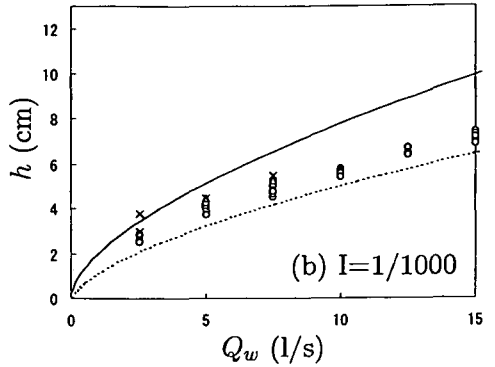
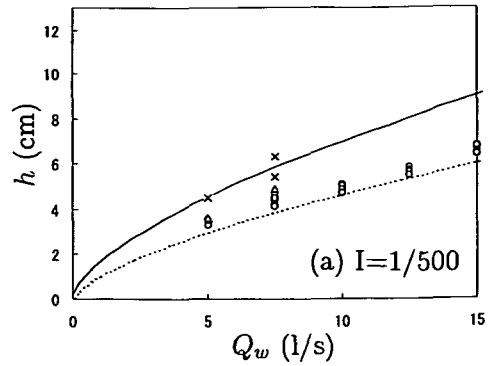


図-8 流水量 Q_w と水深 h の関係。水路床勾配 (a) $I=1/500$, (b) $I=1/1000$ and (c) $I=1/2000$ 。

式(8)と流雪量の実験値と比較するため式(8)中の係数を次のように定めた。空隙率 λ は模擬雪塊が最も密に詰まった状態の $\lambda=0.45$ を用いた。式(8)を調べると、同じ水深 h でも雪層の厚さ h_1 を変化させると、流雪量は変化する。このことは福嶋⁹⁾によって詳細に調べられ、広い範囲の水深 h 、流水量 Q_w に対して、 $h_1 = \alpha h$ ($\alpha = 0.3 - 0.4$)の範囲において最大流雪量が発生することが確かめられた。ここでは、 $\alpha = 0.375$ として解析を行った。係数をこのように定め、式(8)を計算した結果が図中の実線である。これらの図より、理論値は雪塊が底面に接するか、閉塞するデータの付近にある。この実線の下では模擬雪塊は完全に浮遊して流れること

を示し、理論値が実験値をよく説明することを示す。単純に考えて、流水量が増加すると流雪量も増加すると考えてよい。

図-7 (a), (b), (c)は、縦軸に流雪量を流水量で割った流雪量流水量比を、横軸に模擬雪塊投入後の水深をとり、模擬雪塊の流下状況をプロットした図である。本実験では模擬雪塊は完全に浮遊して流れた場合、一層または二層で流れた。すなわち、この場合の雪層の厚さは模擬雪塊の大きさに依存する。実験で得られた雪層の厚さ h_s は、プラスチックボールの直径の一倍あるいは二倍であった。そこで、図-7は、模擬雪塊が一層で浮遊して流れる場合の最大の流雪量を理論式(8)を用

いて求めこれを実線で示した。さらに、二層で流れる場合の最大流雪量を点線で示した。これらの実線及び点線が示すように、模擬雪塊が一層あるいは二層で流れる場合では、流雪量が一定であるため、流水量が増加するに伴って水深が大きくなり、流雪量・流水量比は減少する傾向にある。

ここで、図には示さないが雪層の厚さが連続的に変化する実雪塊の場合には、流雪量・流水量比の理論式は、水路床勾配に関係なく、水路幅 B 、雪層幅 B_s 、空隙率 λ が一定であれば、水路床勾配に関係なくほぼ一定である（摩擦速度 u_{*1} に水路床勾配が含まれるので厳密には一定ではないが、その変化は小さい）。

図-8 (a), (b), (c) は、縦軸に水深、横軸に流水量をとり、模擬雪塊の流下状況を示した図である。ここでも、○印は模擬雪塊が浮遊して移動した場合、△印は底面に接して移動した場合、×印は閉塞した場合を示す。実線は最大流雪量の時の水深を示す理論式で次式で与えられる。

$$h = \frac{Q_w/u_{*1}}{\lambda \bar{u}_s B + \bar{u}_s B(1-\lambda) - \frac{1}{\kappa} B \alpha} \quad (10)$$

図-8が示すように雪投入に伴う水深増加率は閉塞を示す×印で大きくなっていることが分かる。つまり、水深増加率は模擬雪が閉塞するか、しないかの限界付近で大きくなる。ここでも水深の増加に対する理論式は実験値をよく説明するといえる。

以上のように模擬雪塊を用いることにより、主として、流雪量と流水量の関係、流雪量・流水量比に及ぼす水深と水路床勾配との関係、雪投入に伴う水深増加率について実験値を理論式と比較した。いずれの場合も理論式は実測値をかなりよい精度で説明することが明らかになった。一方、本実験には若干の誤差が含まれており、このことが理論値との多少の差が生じた原因である。実験値には以下の原因による誤差が含まれている。

(i) 疑似雪塊の投入時間 本実験では模擬雪塊の数量とベルトコンベアーの能力の関係から、模擬雪塊の投入時間は15から90秒と短かった。特に、最大流雪量が発生する付近では15秒程度であったため、水深は完全には安定していない。これにより、水深増加の測定で誤差が生じているものと考えられる。

(ii) 水路の影響 水路が11mと短く下流が段落ちとなっているので水面形は低下背水となる。従って、理論解析の前提とした等流の条件を完全には満たさない。

(iii) 水路の粗度の影響 本実験では、水路の粗度は水路全体で一定でなく、かつ、滑面から粗面の遷移状態であった。このことも誤差の原因として考えられる。

5. 実雪による検証実験

緩勾配水路においては、急勾配水路に比べ同じ流量でも大きな水深を得ることができ、雪塊は底面に接して輸送されるよりも浮遊して輸送される場合のほうが多いと考えられる。そこで、本章では、雪塊が完全に浮遊して輸送される場合に実際の雪を用いた実験を行い、流雪機構を把握することを目的とする。このため、4節で行った模擬実験との比較検討を行う。

実験は図-9に示す可変勾配水路を用いて行った。水路は幅0.4m、長さ10.0mの三面アクリル板水路である。雪塊の投入は図中に示す場所でベルトコンベアーを用いて定常的に投入した。なお、ベルトコンベアー上の雪の密度と形状ができるだけ一定となるように設定した。雪の密度はベルトコンベアー上の前部・中部・後部でサンプルし、その平均値を用いた。

図-9に示す水深測定点でビデオ撮影を行い水深を測定した。また、雪塊投入後、投入された雪がどのように流下するかを観測した。

以下に示す手順で実験を行った。雪塊の投入量を測定し、ベルトコンベアーに乗せる。ベルトコンベアー上の雪の密度を前部・中央部・後部の3カ所で測定する。所定の流量にセットし、水路内の水位が安定したら、雪塊投入前の水深を測定する。ベルトコンベアーのスイッチを入れた後、雪塊の投入時間を測定する。ビデオ撮影により水深の増加を測定するとともに、雪塊の投入による流雪状況（浮遊して流下、底面に接して流下、閉塞）を観測する。

実験条件は、水路床勾配を $I = 1/1000$ で一定とし、流水量は $3.5 \sim 12.5$ l/s の間の5流量とした。

本実験での雪塊の流雪機構はビデオ撮影、写真等から以下ようになった。ベルトコンベアーの幅に対して水路幅が大きいので雪は横断方向いっぱい広がらずに流れた。雪層は完全に浮遊して流れる場合は、はっきりと固層と水層に分離して流れた。水深があまり大きくないので底面と接して流れるものもあった。雪塊は投入後すぐに水を吸収し、ほとんど水面に姿を現さない。

図-10 (a), (b) は横軸に流水量 Q_w 、縦軸に流雪量 Q_s をとり雪塊の流下状況をプロットしたグラフである。○は雪塊が浮遊して移動した場合、△は底面に接して移動した場合（以下で遷移領域と呼ぶ）、×は閉塞した場合を示す。実線は式(11)で表される最大流雪量の理論式である。

$$Q_s = B_s h_s \bar{u}_s Q_w / \{ \bar{u}_s (B_s h_1 + 2bh + B_s h_0 \lambda) - (1/\kappa) (B_s h_1 3bh_1 + 2bh_0) \} \quad (11)$$

ここで、 Q_s は体積流雪量、 Q_w は流水量である。上式中の係数を以下のように求めた。空隙率 λ は、雪塊の見かけの

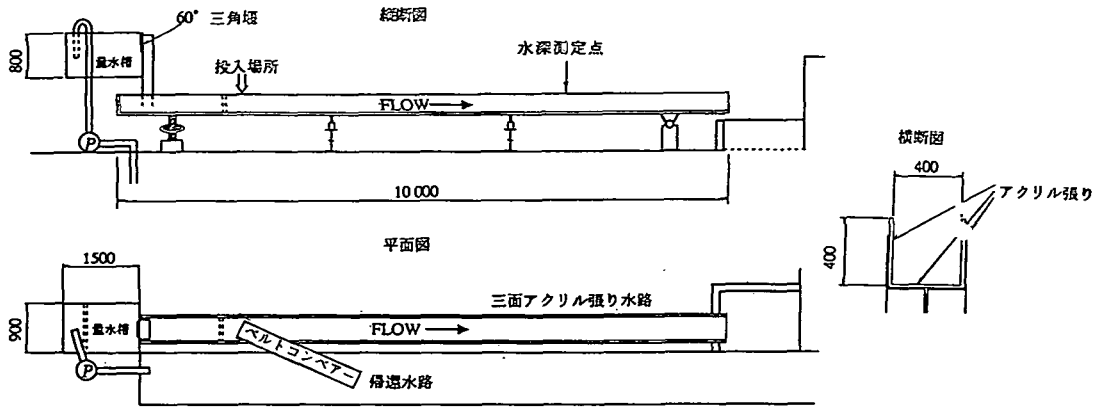


図 - 9 実験装置 No. 2

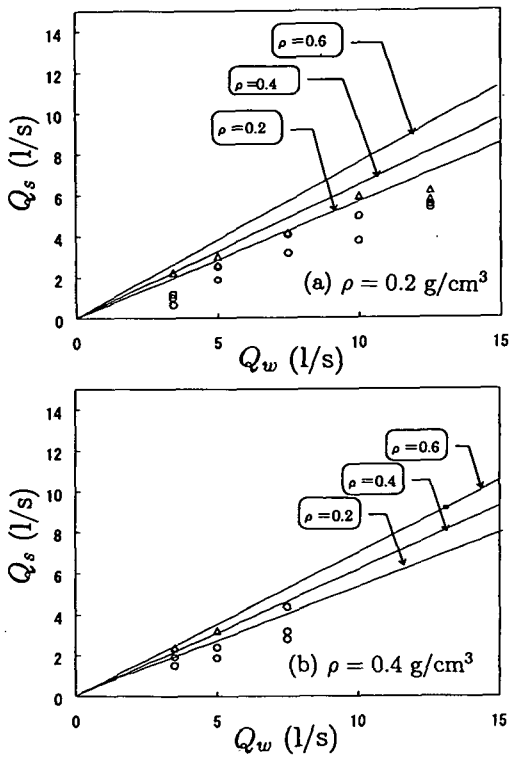


図 - 10 流量 Q_w と流雪量 Q_s の関係。(a) 雪の密度 $\rho = 0.2 \text{ g/cm}^3$ と (b) $\rho = 0.4 \text{ g/cm}^3$

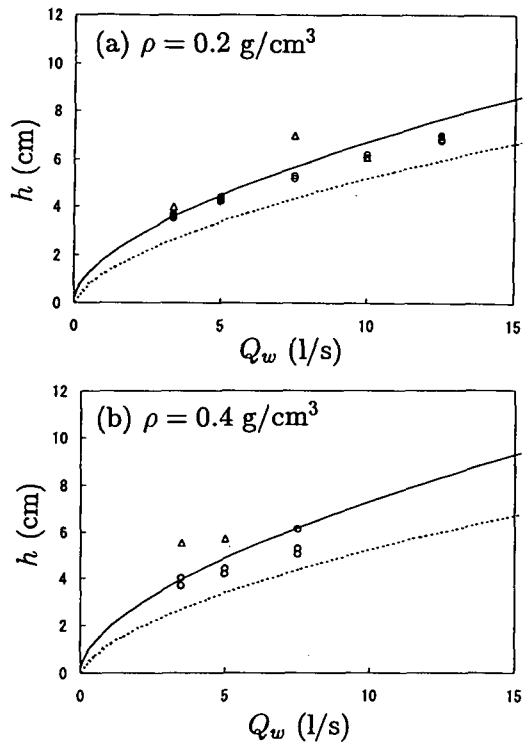


図 - 11 流量 Q_w と水深 h の関係。(a) 雪の密度 $\rho = 0.2 \text{ g/cm}^3$ と (b) $\rho = 0.4 \text{ g/cm}^3$

比重 γ_s と純氷と水の密度より、 $\lambda = 1 - \rho_w \gamma_s / \rho_i$ となる。水層の厚さ h_1 は $h_1 = (0.3-0.4)h$ の範囲において最大流雪量が得られることから、 $h_1 = 0.4h$ とした。雪層幅 B_s はベルトコンベアによる投入幅より決定した。図 - 10 (a), (b) では雪の見かけの密度をパラメータとしている。(a) の実験値は雪の見かけの密度 $\rho_s = 0.2 \text{ g/cm}^3$ 、(b) の実験値は見かけの密度 $\rho_s = 0.4 \text{ g/cm}^3$ の場合である。これらの図より、理論値は実験値の浮遊限界にほぼ一致し

ており、雪塊が浮遊して輸送される場合の流雪能力を適切に表現しているのがわかる。また、理論によると流雪量は雪塊の見かけの密度 ρ_s によって変化すると予想される。実験値を見ると図 - 10 において Δ で示される遷移領域は、約 $\rho_s = 0.2 \text{ g/cm}^3$ の雪塊を用いた (a) では、ほぼ $\rho_s = 0.2 \text{ g/cm}^3$ の理論線上にあり、約 $\rho_s = 0.4 \text{ g/cm}^3$ の雪塊を用いた (b) では、ほぼ $\rho_s = 0.4 \text{ g/cm}^3$ の理論線上にあることが示された。このように理論値は見かけ

表 - 3 模擬雪実験(model snow)と実雪実験(real snow)の結果の比較

	Q_s/Q_w	h/h_n	ρ_s (g/cm ³)
model snow	0.6	1.4	0.495
real snow	0.5	1.4	0.2~0.4

の密度 ρ_s の違いによる流雪量の違いを説明できることが示される。

図 - 11 (a), (b) は横軸に流雪量, 縦軸に水深をとり, 流雪状況をプロットした図である。実線は式(12)よりもとめた最大流雪量の発生する水深, 点線は, 式(13)より求めた無雪時の水深である。

$$h = \frac{\frac{Q_w}{u_{*1}} - \{\bar{u}_s B_s (1 - \lambda) - \frac{1}{\kappa} (B_s + b)\} h_1}{\bar{u}_s (B_s \lambda + 2b) - \frac{2}{\kappa} b} \quad (12)$$

$$h_n = \frac{Q_w}{u_{*n} B (\bar{u} - \frac{1}{\kappa})} \quad (13)$$

ここで, \bar{u} は無雪時の無次元水表面速度である。図 - 11 (a), (b)に示すように, 実線の最大流雪時の水深は, 浮遊と底面に接して移動する遷移領域の実験値(Δ 印)とほぼ同程度の値になっていた。今回の実験では雪の投入時間がベルトコンベアーの性能から20秒程度であり, これ以上投入時間を維持することは難しかった。このため, 流れが平衡状態に到達していなかったことが水深が小さくなった理由と考えられる。

6. 模擬雪実験と実雪実験との比較

模擬雪を用いた実験(模擬雪実験と呼ぶ), 実際の雪を用いた実験(実雪実験と呼ぶ)ともに, 各種の実験値は理論値とほぼ一致した。二種類の実験の結果を表 - 3に比較して示す。ここでは水路床勾配1/1000の結果を用いた。ここで, 模擬雪実験で用いた模擬雪塊の見かけの密度は, $\rho_s = (1 - \lambda)\rho_i$ より求めた。ここで空隙率 $\lambda = 0.45$ とした。

表 - 3のように流雪能力については, 模擬雪実験の方が実雪実験に比べて大きい。これは, 模擬雪実験の方が雪の実験に比べ見かけの密度 ρ_s が大きいためであり, これは理論の示すとおりである。また, 実雪実験では様々な大きさの雪塊があり, 大きめの雪塊を投入するとすぐに底面に接してしまい比較的小さな流雪量でも閉塞のおそれがある。図 - 10に示すように, 実雪実験では比較的小さな流雪量・流水量比でも底面に接した。一方, 模擬雪実験では, 模擬雪塊の形状が一定であるため流雪能力の限界は, 明瞭に表れる。実際の雪では, このような雪の大きさと密度にばらつきがあることから理論による最大流雪量に対し余裕を持った投雪を行

うことが重要である。

表 - 3に示すように水深の増加に関しては, 模擬雪実験, 実雪実験の双方とも $h/h_n \approx 1.4$ と同じ程度の値となった。理論の示すように, 水深増加率に関しては, 雪の密度による変化はあまり大きくない。今回の実験では見かけの密度は模擬雪実験で約0.5, 雪実験で0.2から0.4であり, この範囲では水深の増加はほぼ同じであった。流雪溝設計運営要領¹⁾によると, 水深の増加は雪投入前に比べて約2.5倍となるとの報告もある。今回の測定では, 水深増加率はこれよりかなり小さい。このことを考慮すると, 約2.5倍の水深増加は主として雪の閉塞に起因すると想像される。したがって, 水深増加率を低く押さえるためには, 雪閉塞を発生させないように雪投入を注意深く行うことが必要であると考えられる。

7. おわりに

流雪溝内で雪塊が完全に浮遊している場合の, 流雪溝内の雪と水の挙動を調べるため, 模擬雪塊と実際の雪による実験を行った。まず, 福岡⁹⁾による理論の前提である, 雪水混合流がビンガム流体であるとの仮定を検証するため, 模擬雪が浮遊する場合の流速分布を測定した。その結果, 雪水混合流の下の水層の流速が理論の示すような対数流速分布をなすこと, 上部の雪水混合流の部分は水層の流速より僅かに小さくなることを示した。

また, 流雪量の測定から, 流雪量・流水量比が理論の示すように $Q_s/Q_w = 0.5$ 程度になることを, 模擬雪実験, 雪実験の双方から確かめた。この流雪量・流水量比の大きさは, 従来より報告されている急勾配の流雪溝の値とほぼ等しく, 本研究の対象とした緩勾配の流雪溝においても十分な流雪能力を確保できることが実験によって確認された。

雪投入に伴う水深増加率についての測定では, 実験の範囲では $h/h_n = 1.4$ 程度となり, 雪が完全に浮遊して流れているような状況では, 従来報告されている値の2.5倍に比べて小さい。これより, 大きな水深増加率を生じる条件は, 大きな雪塊が投入され, 底面と接触して閉塞を起こすような状況であると考えられる。

今後の課題としては以下のような点が挙げられる。雪の閉塞は直線部に比べ曲線部や湾曲部で生じやすいと考えられる。したがって, そのような場合の流雪溝の雪輸送についての理論的・実験的研究が必要である。また, 本実験では, 雪の融雪効果は全く無視されている。特に新潟県や富山県等の北陸地方では気温, 水温が比較的高いことから融雪効果を考慮した研究が必要である。

本研究は, 文部省科学研究費補助金, 試験研究(B)

(課題番号 06555147, 代表 福嶋祐介) の援助のもとに行われた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省北陸地方建設局監修：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，1986.
- 3) 大熊孝，大川秀雄，神立秀明，宮拓男，水落直人：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51巻，第4号，pp. 239-251，1989.
- 4) 大熊孝，米内弘明，星野和利，小野雄二：流雪溝の流雪能力と塗装によるその改善，土木学会論文集，第359号／IV-3，pp.99-106，1985.
- 5) 土屋雷蔵，宮岸治男：流雪溝設計運営要領について，第1回土木学会新潟会調査研究発表会論文集，pp.9-16，1983.
- 6) 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. 801-805，1983.
- 7) 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.
- 8) 福嶋祐介，早川典生，村上正人：緩勾配地における流雪溝の流雪能力，雪氷，第55巻，pp. 343-351，1993.
- 9) 福嶋祐介：流雪溝中で完全浮遊する雪塊の最大流量の検討，雪氷，第57巻，第4号，pp. 339-348，1995.

(1996. 5.14 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON SNOW TRANSPORT IN AN OPEN CHANNEL USING MODEL AND REAL SNOW

Yusuke FUKUSHIMA, Norio HAYAKAWA and Takeshi SHINTANI

Experiments on the snow removal system using an open channel are carried out using the model snow lumps and the real snow lumps. Large amount of plastic balls are used in the experiments. Thus, the velocity profiles in the open channel flow with model snow lumps can be measured. The velocity profiles in a lower part occupied with water are approximated by the log-law. The speed of plastic balls is a little smaller than the velocity of water under balls. The snow transport rate, the increase rate of the depth are also measured for the model snow lumps and the actual snow lumps experiments. These experimental results are shown to be explained by the theory developed by one of the authors.