

## 高歪速度下でのスラッシュの粘性係数の測定

小林俊一\*・川村公之\*\*・津川圭一\*\*・和泉 薫\*

Measurement of viscosity of slush at high shear rates

by

Shun'ichi KOBAYASHI, Kimiyuki KAWAMURA, Keiichi TUGAWA  
and Kaoru IZUMI

(Abstract)

Measurements of viscosity of slush were carried out using a method of flow along an inclined smooth surface in a 0°C cold room. The method was used to get the values of viscosity under high shear rates (25 and 75s<sup>-1</sup>).

From our experiments two important results were obtained : 1) the viscosity of slush decreases with increasing shear rates ; 2) The fluid behaviour is pseudoplastic that the values of non-Newtonian index of viscosity were less than unity.

Key words : slush, viscosity, shear rate, shear stress

キーワード : スラッシュ, 粘性係数, せん断速度, せん断応力

### I は じ め に

近年, 流雪溝や管内輸送方式のように雪と水の混合状態での雪処理が盛んに行われるようになった。雪と水の混合体の呼び名については決った名前がない。前回の報告(小林他, 1987)ではスノージャムと呼んだが, スラッシュ(slush)という名が国際的に通用しているので本報告ではスラッシュと呼ぶことにする。

雪と水の混合体の状態から自然界に存在するものとしては, 河川や湖沼又は海の凍結における初期の段階のフラジルアイス, 融雪期のスラッシュ雪崩などである。これらの基本的な問題点はその流動性である。流動性を左右する物理定数は粘性係数である。スラッシュの粘性係数の測定は, 市販の単一円筒回転粘度計を用いて阿部・斉藤(1986)によって測定されたが, この方法では, ずり速度(又はせん断速度ともいう)が1.0s<sup>-1</sup>より小さい場合にしか測定は成功しなかった。すなわち, 円筒の回転速度を速くすると円筒とスラッシュの間に隙き間が生じて, スラッシュの粘性係数が測定できなくなる。そこで今回は, 開水路の斜面流の実験から, スラッシュの表面流速と流れの厚さを測定して理論式から粘性係数を計算して求め, ずり速度が25から75s<sup>-1</sup>の場合の値を得ることができたのでその結果を報告する。

### II スラッシュの定義

スラッシュの定義は簡単には決められないが, ここでは「水で飽和した雪」と考える。そして定量的な表現としては, 水で飽和した雪の密度で表わすことが一般的と思われるが, その場合, 理論的にはス

\* 新潟大学積雪地域災害研究センター \*\*新潟大学工学部土木工学科学生

ラッシュのとり得る密度範囲は $1.0\text{g/cm}^3$ (水)と $0.917\text{g/cm}^3$ (氷)の範囲に限られてしまうことになり、その範囲が余りにも狭く実際問題としては精密な密度測定が要求され実用的でない。そこで雪と水の混合の重量比又は体積比で表わした方が都合が良いと思われるので、図-1に雪の乾き密度に対する雪と水の重量比の関係を示した。新雪ほど、すなわち密度が小さくなるほど雪と水の重量比が急に大きくなることを示している。体積比でプロットしても傾向は同じである。この図は、乾いた雪に、雪の粒子間の移動がないように静かに $0^\circ\text{C}$ の水を注いで、空気に充填させることを想定して作ったものであるが、実際問題としては、はじめに密度が大きい乾き雪でも水を含んできて、粒子間の結合が断ち切れたり、結晶形の変化が生じたりすると空隙率が変化し(若浜, 1965; 対馬, 1978)、単位体積当りの雪と水の重量比も容易に変化してしまう。この点においてスラッシュの定義の困難さを含んでいるが、ここでは、雪粒子の移動は考えないで定義した。

我々の斜面流の実験では、雪(S)と水(W)の重量比が1:5以上ないと、すなわち $W/S \geq 5$ でない流動性を示さないで、この付近の重量比で実験を行った。すなわち、重量比がこれ以下だと雪はかたまりとして残り水が分離して互いに別々の運動をし、混相流の状態にならなかった。

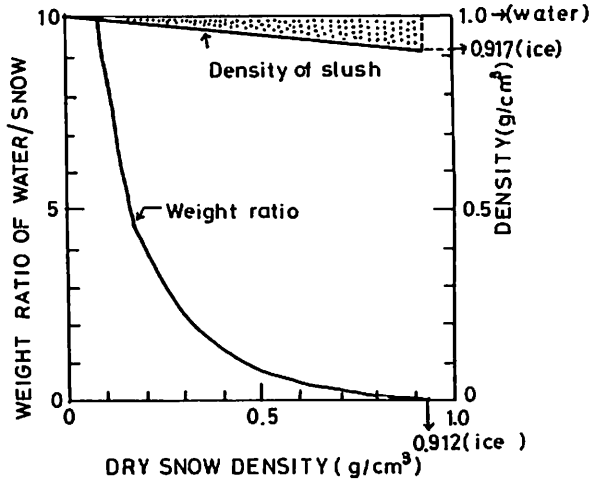


図-1 雪の乾き密度と水と雪の重量比の関係とスラッシュの密度範囲

Fig. 1 The relation of weight ratio of water/snow to dry snow density and the region of slush density.

### III 原理と実験方法

#### 1 用水路の斜面流

いま、ニュートン流体が用水路の斜面上を定常的に薄い流れで運動していると仮定する。この場合流れは乱流状態ではなく層流と仮定する。定常流の一部分を拡大すると図-2のごとくで、更にこの流れの中に厚さ $\delta x$ 、長さ $L$ の薄い層を考え、この中の運動量平衡を考える。 $z$ 方向は流れによる運動量、 $x$ 方向は粘性による運動量を考え、 $y$ 方向の運動量変化はないものとする。図から、全体の運動量平衡を考察すると、流体の最大流速は表面で現われ、結果は次の式になる(例えば Bird他, 1960 参照)。

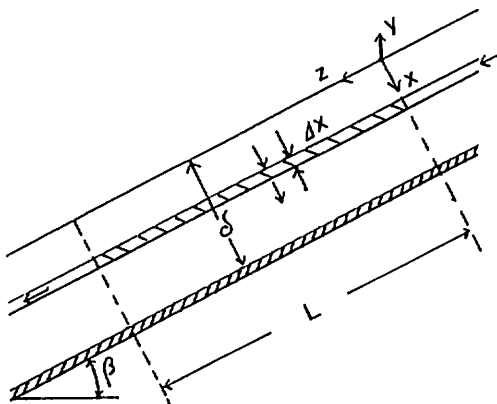


図-2 開水路の斜面流

Fig. 2 Flow along an inclined smooth surface.

$$v(\max) = \frac{\rho g \delta^2 \cos \beta}{2\mu} \quad (1)$$

ここで $\rho$ はスラッシュの密度、 $g$ は重力の加

速度,  $\delta$  は流れの厚さ,  $\beta$  は斜面の勾配,  $\mu$  はスラッシュの粘性係数である。したがって(1)式からスラッシュの表面流速と流れの厚さを測定できれば, 粘性係数が求まる。

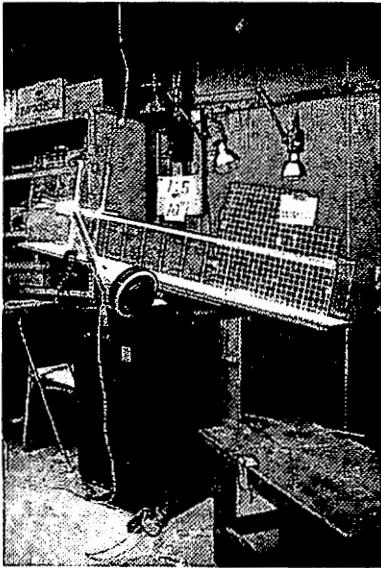


図-3 装置の概観

Fig. 3 Measuring apparatuses.

## 2 実験方法

実験は, 室温 0°C に保持された低温室内に, 図-3 の写真に示したような傾斜が可変な台 (鈴木・藤田, 1983) の上に図-4 に示したような巾が 15cm のアクリル材で作った小型開水路をのせてスラッシュを流動させた。スラッシュ用の雪は昭和 62 年 5 月に奥

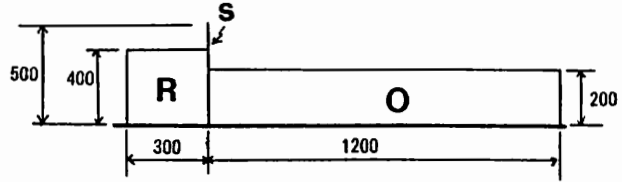


図-4 開水路の寸法 (mm)

R : スラッシュ貯め部, O : スラッシュ流動部,  
S : シャッター

Fig. 4 Open transparent channel (mm).

R : slush reservoir, O : slush run-off section,  
S : shutter

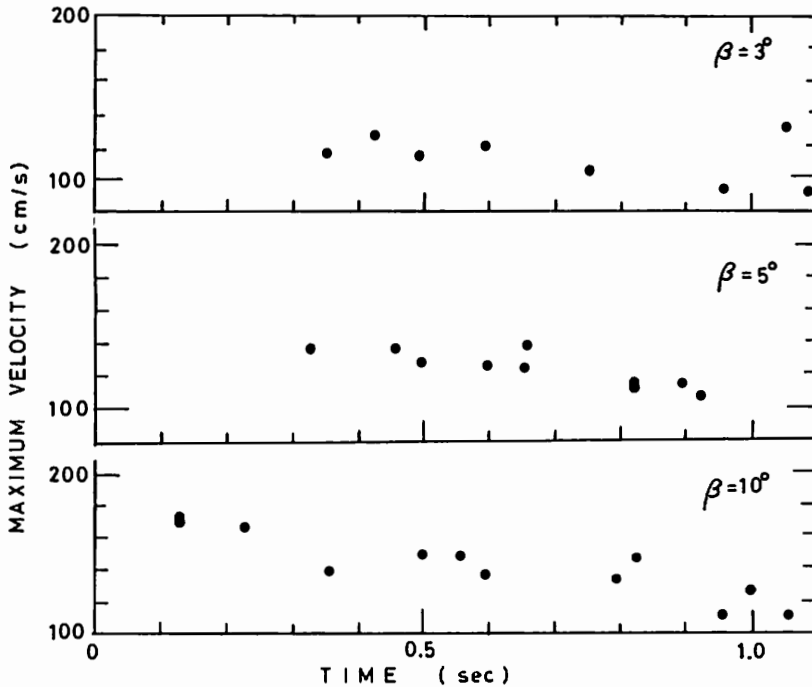


図-5 最大流速の変化

Fig. 5 Maximum velocity of moving slush in the case of an inclination angles of 10, 5 and 3°.

只見銀山平にて採集し、 $-20^{\circ}\text{C}$ の低温室に保存したものをその年の9月頃から実験に使用した。使用時、雪を粒径が $0.5\sim 2.0\text{mm}$ になるまで砕き、水は $0^{\circ}\text{C}$ の水道水を使った。1回の実験では $1\text{kg}$ の雪に $5\text{kg}$ の水を混合して、図-4の開水路の上部に貯め、良くかき混ぜた後シャッターを開いて自然流動させた。この時のスラッシュの密度の実測値は $0.917\text{g}/\text{cm}^3$ で水の密度に等しかった。理論的にはこれより大きな値をとるが、測定精度が悪いと考えられる。

実験は、斜面の角度を $10, 5, 3^{\circ}$ の3通り変えて行い、流速と層厚はビデオカメラ(日立, VK-C3400)で撮影し、 $1/30$ 秒毎の再生画像から測定した。

#### IV 実験結果

##### 1 最大流速と層厚

ビデオカメラによるスラッシュの流動の撮影の $1/30$ 秒毎の再生画像から、上部から $0.8\text{m}$ 地点におけるスラッシュの流れの表面流速と層厚の測定を行った。測定は、傾斜角を $10, 5, 3^{\circ}$ に変えて行い、表面流速については1つの傾斜角で実験は4~5回繰り返された。表面流速は、表面に見える特徴的な固まりや発泡スチロール片を追跡マークとして上流部から $0.8\text{m}$ 地点を通過する距離と時間から計測した。その結果を図-5に示した。この図では4~5回の実験結果を重ねて表わしてあるので一連の実験値ではない。しかし層厚に関しては、

$0.8\text{m}$ 地点を流れの先端が通過した後の $0.1$ 秒から $1.06$ 秒までの間の $1/30$ 秒毎の再生画像から読みとった。その層厚の時間変動を図-6に示した。表面流速を流れの最大流速と考え、最大流速と層厚の平均値を表-1に掲げた。傾斜角が増えると最大流速は大きくなるが、逆に層厚は薄くなる傾向を示した。これ

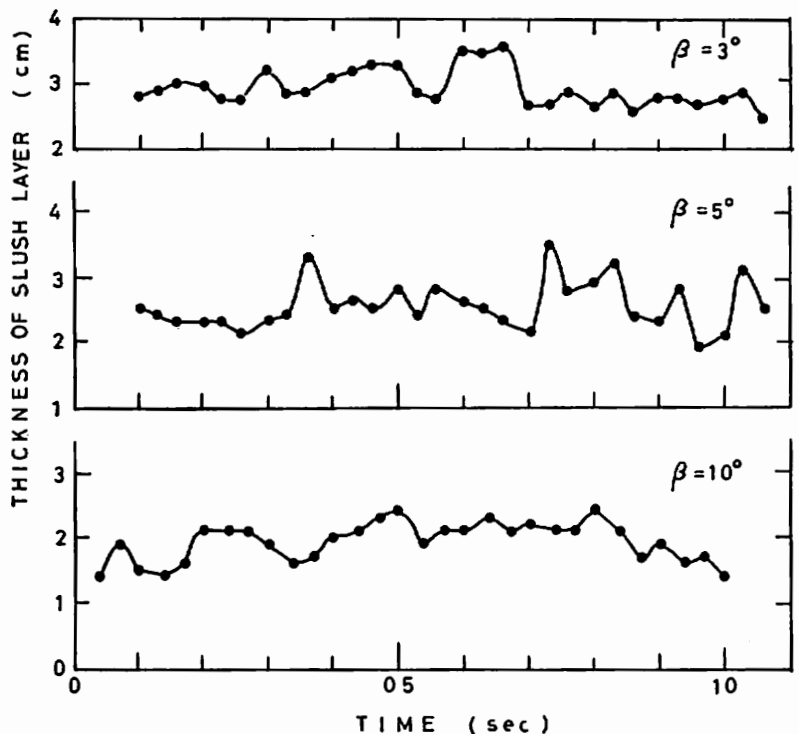


図-6 層厚の時間変化

Fig. 6 Time variation of slush thickness.

表-1 最大流速と層厚

Table. 1 Maximum velocity and thickness of slush flow

傾斜角	$10^{\circ}$	$5^{\circ}$	$3^{\circ}$
最大流速 (cm/s)	141.2	124.0	104.1
層厚 (cm)	1.9	2.5	3.0

は(1)式の理論式と合わないので理論と実際の不一致として問題である。しかし、流れのレイノルズ数 ( $Re$ ) フルード数 ( $Fr$ ) を計算してみると表-2のごとくで、(4~25)  $<Re<$  (1000~2000) の場合はさざ波を伴う層流と考えられ、図-6の層厚の変化からさざ波を伴うように見られることから、近似に、この理論式の利用は適当と考えられる。

表-2 レイノルズ数 ( $Re$ ) とフルード数 ( $Fr$ )  
Table. 2 Reynolds number and Froude number of slush flow

傾斜角	10°	5°	3°
$Re$	58.0	33.6	19.7
$Fr$	4.8	2.8	1.6

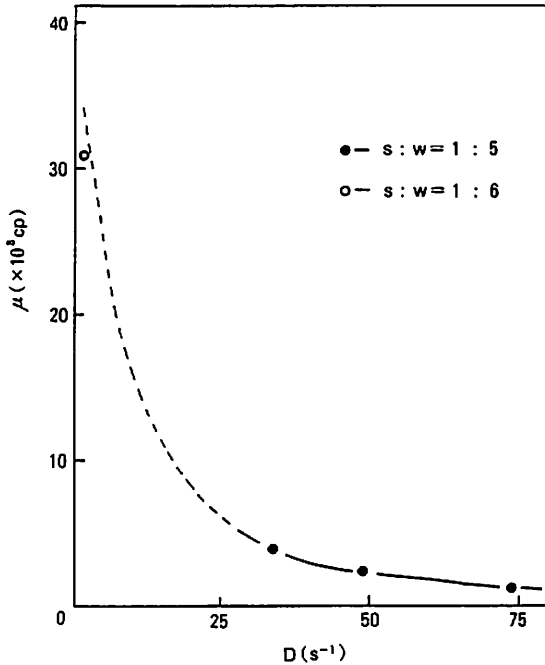


図-7 粘性係数とせん断速度の関係  
Fig. 7 Viscosity of slush ( $\mu$ ) as a function of shear rate ( $D$ ).  
○ ; viscometer experiment  
● ; falling slush flow experiment

ン定数である。例えば、見かけの粘性係数  $\eta_a$  を次のごとく定義すると、

$$\eta_a = S/D \quad (3)$$

擬塑性流体の場合は、次の(4)式となる。

$$\eta_a = \frac{\mu \cdot D^n}{D} = \mu D^{n-1} \quad (4)$$

もし、 $n < 1$  ならば、(4)式は図-7の関係を表わしていることになる。そこで、スラッシュの表面でのせん断応力は次式から計算できるから、

$$S = \rho g \delta \cos \beta \quad (5)$$

## 2 粘性係数

表-1の最大流速と層厚の値を用いて(1)式から粘性係数を計算することができる。又最大流速を層厚で割ったものは、ずり速度(せん断速度)である。これらの得られた値を図-7に示す。図の中には、単一円筒回転粘度計で得られた値(○印)も記入してある。スラッシュの粘性係数は、せん断速度の増加と共に急激に減少し、せん断速度が大きくなるとスラッシュは水の粘性に近づく(0℃の水の粘性係数は1.79cpである)。又、スラッシュの雪と水の重量混合比は今回の実験は1:5で、回転粘度計による実験の時は1:6であったので、ほぼ同じ状態のスラッシュ流体とみなせる。このように、せん断速度の増加と共に粘性係数の減少する流体は非ニュートン流体と言われ、特に図-7のような関係をもつものは中でも擬塑性流体(pseudoplastic fluid)とも呼ばれ、次の指数関係の法則が適用できる(Bird他, 1960)。

$$S = \mu \cdot D^n \quad (2)$$

ここで  $S$  はせん断応力、 $\mu$  は粘性係数、 $D$  はせん断速度、 $n$  は1と0の間の値をもつ非ニュートン

せん断応力とせん断速度の関係を図-8のごとく両対数グラフ上で表わすと、その勾配が  $n$  の値となる。図中、 $n = 1$  はニュートン流体に相当し、A、B、Cの直線はこれまでの研究によって得られたスラッシュの関係を示したもので夫々  $n$  の値は0.38、0.41、0.52である。したがって、我々の実験から、スラッシュは擬塑性流体といえる。また、図-7の関係で、せん断速度の大きい所で粘性係数が一定値をとるものをビンガム (Bingham) 流体と呼び、流体の特性は似た部分がある。したがってこれまでもDent and Lang (1983) は雪崩のモデルに、ビンガムモデルを適用したことがあり、このモデルには低いせん断応力のところで大きな粘性係数を、高いせん断応力のところで小さい粘性係数を採用している点、我々の得た結果と一致している。

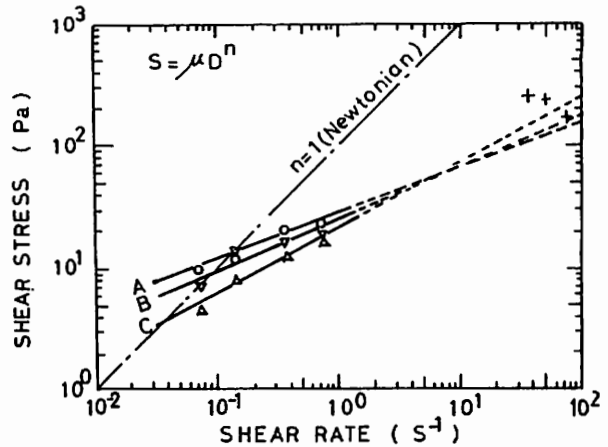


図-8 せん断応力とせん断速度の関係  
 Fig. 8 Relation between the shear stress ( $S$ ) and the shear rate ( $D$ ).  
 ○, ▽, △; viscometer experiment  
 +; falling slush flow experiment

## V あ と が き

今回は、せん断速度の大きい場合 ( $25 < D < 75 \text{ s}^{-1}$ ) のスラッシュの粘性係数を用水路の斜面流の実験から決めた。理論式と実験結果の間に不一致が見られたものの、前回の二重同心円筒の間にある流体が一方の円筒を回転させたとき運動するクエット流理論に基いた回転粘度計から求めた値を含めると、擬塑性流体の特性が得られた。そして非ニュートン定数の値は0.38~0.52の間であった。

今後は、雪と水の混合比の変化の影響や流れの中の微視的な運動をも調べる必要がある。特に、ここで得られた実験結果は、ごく制限された均質なスラッシュの状態の一例について調べたもので、実際の流雪溝の中の雪氷の状態は非一様、非均質なものであるから、この点にも着目した研究が必要である。

最後に、本研究を行うにあたり、可変傾斜装置をお貸し下さった新潟大学災害研の藤田至則元教授、鈴木幸治技官に感謝いたします。

なお、本研究は、昭和62年度新潟大学工学部土木工学科の卒業研究として著者のうちの川村 (1987) が行ったものの一部を解析してまとめたものである。

文 献

- 阿部真一・斉藤龍夫 (1986): 雪氷に関する基礎研究, 第1部スノージャムの流動性に関する基礎研究. 昭和61年度新潟大学工学部土木工学科卒業研究論文.
- Bird, R. B., W. E. Stewart and E. N. Lighfood (1960): Transport Phenomenon. John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sydney, pp780.
- Dent, J. D. and T. E. Lang (1983): A biviscous modified Bingham model of snow avalanche motion. *Annals of Glaciology*, 4, 42-46.
- 川村公之 (1987): スノージャムの流動性とハイドロリックジャンプに関する基礎的研究. 昭和62年度新潟大学工学部土木工学科卒業研究論文.
- 小林俊一・阿部真一・斉藤龍夫・小林俊市・佐藤和秀・和泉 薫 (1987): スノージャムの粘性係数の測定. 新潟大学災害研年報, 9, 159-166.
- 鈴木幸治・藤田至則 (1983): 地すべり実験装置. 新潟大学災害研年報, 5, 127-132.
- 対馬勝年 (1978): 水に浸った雪の粗大化. 雪氷, 40 (4), 1-11.
- 若浜五郎 (1965): 水を含んだ積雪の変態, 低温科学, 物理篇, 23, 51-66.