

スノージャムの粘性係数の測定

小林 俊一*・阿部 真一**・斎藤 龍夫**
小林 俊市***・佐藤 和秀****・和泉 薫*

Measurements of viscosity in snow jam

by

Shun'ichi KOBAYASHI, Shin-ichi ABE, Tatsuo SAITŌ,
Toshi-ichi KOBAYASHI, Kazuhide SATŌ and Kaoru IZUMI

(Abstract)

Measurements of viscosity of snow jam (water-snow mixed liquid) were carried out using a unicylinder type viscometer in a room with a constant temperature, 0 °C. In these experiments snow jam was made by changing the amount of snow from 10 to 100g in water, so that the total volume was kept at 500ml. In the case where the speed of rotation of rotor was higher than 12rpm, a slip occurred at a boundary between the snow and the rotor. Therefore, to determine the viscosity of snow jam, only the data of which the speed of rotation was slower than 12rpm were used.

From the experimental relationship between viscosity and shear rate, the property of snow jam showed the non-linear relation with characteristics of a non-Newtonian fluid.

Key words : snow jam , viscosity, plastic flow

キーワード: スノージャム, 粘性率, 塑性流動

I ま え が き

北陸地方を中心とする日本海側の豪雪地帯では、水と雪の混合状態で雪処理を行う流雪溝や消雪パイプが普及している。この場合の水と雪の混合物をここではスノージャムと呼ぶ。このスノージャムは、自然界でも見られ、河川や海水の凍結の初期段階のフラジライスや湿雪表層雪崩の特に水分を多く含んだスラッシュ雪崩がこれに相当する。

この雪と水の混合体の流れは、固液二相流とか雪水混相流とか呼ばれ流動性に富むので、その粘性係数(粘度)の値が基本的な物理定数である。しかるに、このスノージャムの粘性係数の測定に関する研究は、木下(1963)による圧縮粘性係数の測定があるのみで、ほとんどない。そこで市販されている回転粘度計を用いてスノージャムの粘性係数を測定したので報告する。

ここでスノージャムという言葉の明確な定義はないが、藤岡他(1963)は尾瀬沼のスノージャムの調査で次のように記述している。すなわち、沼の表面に薄い氷が成長した直後に多量の降雪がその氷の上

* 新潟大学積雪地域災害研究センター ** 新潟大学工学部学生 *** 国立防災科学技術センター雪害実験研究所
**** 長岡工業高等専門学校

に積もると、その重みで水は積雪をのせて次第に沈降し、水が浸透し、水しみ雪となる。その結果、浮力と水面上の積雪重量が平衡し、積雪の断熱効果で水とはならず全層雪の状態では水中に没する。その水中に懸垂する雪のことをスノージャムと呼んでいる。

II 測定原理と方法

粘性に関する概念は、1687年ニュートンの著書「プリンシピア」の中で述べられた。すなわち「液体各部の滑らかさの不足から起こる抵抗は、他の条件が同じであれば、液体各部が互いに引き離される速度に比例する」（例えば、柳沢：1957参照）。この仮説は、抵抗をせん断応力、速度をせん断速度に置きかえれば、せん断流動（shearing flow）と考えることができる。図-1は、距離 h だけ離れた平行な平板間に粘性流体を満たし、上板のみに力 P を加え、速度 V で移動させる。結果として、平行板間の流体は流動し速度勾配を生ずる。この場合、流動は層流で、板と流体の間には滑りがないと仮定される。図-1において、水平方向に座標を X 、垂直方向を Z とすれば、せん断速度 D は、次の(1)式で表わされる。

$$D = dV / dZ = V / H \quad (1)$$

また、せん断応力 S は、次の(2)式で表わされる。

$$S = P / A \quad (2)$$

ただし、 A は流体と接触する板の面積である。ニュートンの仮説に従えば、(1)式と(2)式を用いて、

$$S = \eta \cdot D \quad (3)$$

の関係式が得られる。ここで η は比例定数で、これを粘性係数（coefficient of viscosity）又は粘度（viscosity）と呼び、この(3)式がニュートンの粘性法則であり、この(3)式に従う流体をニュートン性流体と呼んでいる。すなわち、ニュートン性流体は S - D 流動曲線が原点を通り直線となる。この S - D 流動曲線が直線でなかったり、又は直線でも原点を通らない流体は一般に非ニュートン性流体と呼ぶ。

粘性係数を測定する方法としては種々あるが、本研究では、非ニュートン性流体の流動曲線を求めることが可能な、単一円筒回転粘度計（東京計器製）を用いた。装置の略図を図-2に示す。図中の M は同期モーター、 G は変速機構、 B はローター、 P は指針、 S はスプリングである。ローターには、種々の形状があるが、本実験では図-3に示した寸法のローターを用いた。この粘度計は、ローターを粘性流体の中に入れて回転させ、流体の粘性抵抗により、ローターに働く抵抗トルクをスプリングのねじれ角度を指針によって読み、粘度を計算することができる。すなわち、せん断応力（ S ）とねじれ角（ θ ）の関係は、 $S = K_1 \cdot \theta$ 、せん断速度（ D ）とローターの回転数（ N ）の関係は $D = K_2 \cdot N$ であり、 K_1 、 K_2 はそれぞれせん断応力定数、せん断速度定数と呼ばれ、ローターの形状によって標準液を用いて実験的に決定される。図-3の形状のローターに関しては、 $K_1 = 0.298$ 、 $K_2 = 0.244$ である。従って、粘性係数 η は(3)式から決定できる。

実験は、室温を 0°C に制御した低温室の中で、図-4に示した装置全体を設置して行った。試料（ス

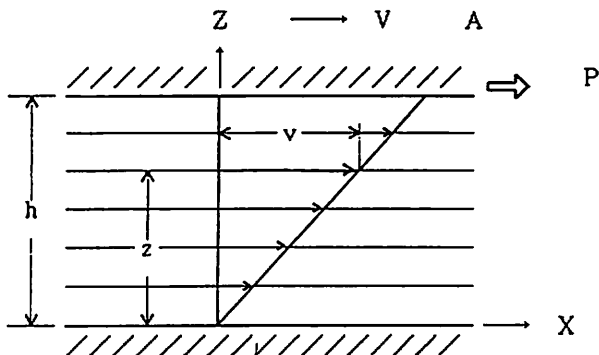


図-1 せん断流動
Fig. 1 Shearing flow.

ノージャム)の雪は、1986年5月に奥只見銀山平から採取したものを3mmのフルイでほぐして使った。粒径は0.5~3mmの範囲であった。この雪をトルビーカーに入れ、0℃の水道水と良く混合して全体を500mlとした。粘度計は毎分の回転数を0.3, 0.6, 1.5, 3, 6, 12, 30, 60 (rpm)と8段階に変化させた。又、雪混入量は10gずつ増加させて測定し、一度使用した試料は再度使用せずに実験を行った。

更に、ローターの回転速度が60, 30, 12, 6rpmと速い場合には、10秒間隔で粘度計の指数(θ)を3分間読み、最後の1分間の読みの平均値を用いた。

3, 1.5, 0.6, 0.3rpmの場合には、10分間測定し、その平均値を用いた。例えば、回転速度が0.3rpmの場合、10分間の読みとりは3回である。一般に雪混入量が多い程、時間の経過と共に指数の変化が大きくスノージャムの状態が攪はんと共に変化しているものと考えられる。したがって、1状態の測定には平均5回の測定を行いその平均値を使った。500mlのトルビーカー中のスノージャム状態の写真を図-5に示す。

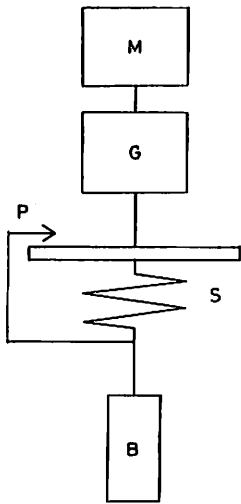


図-2 単一円筒回転型
粘度計

M : 同期モーター
B : ローター
S : スプリング
G : 変速機構
P : 指針

Fig. 2 Schematic diagram of uni-cylinder type viscometer.

M : Moter
B : Rotor
S : Spring
G : Change speed mechanism
P : Dial reading

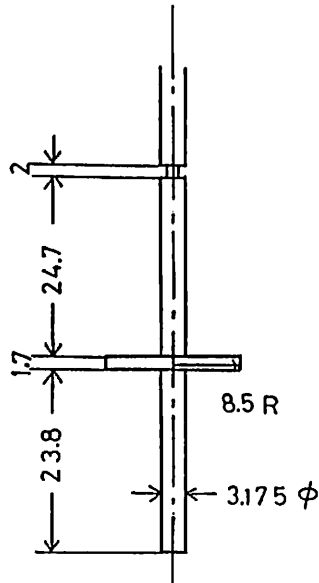


図-3 ローターの形状
(単位mm)

Fig. 3 Shape of rotor.

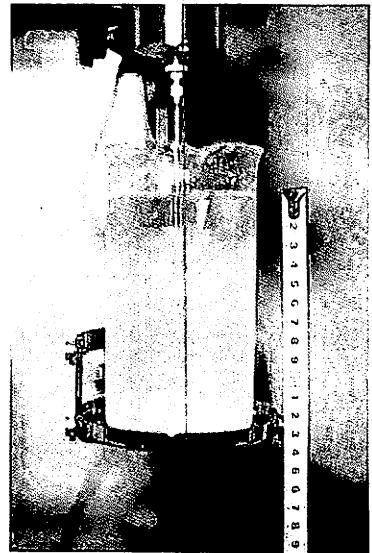


図-5 $W_s=90g$ の場合の
スノージャムの状態

Fig. 5 Snow jam in the case of $W_s=90g$.

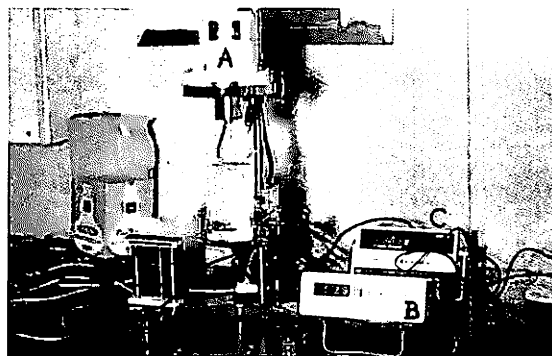


図-4 測定装置 A : 粘度計, B : コントローラー, C : 温度計

Fig. 4 Measuring apparatuses. A : Viscometer, B : Controller, C : Thermometer.

III 実 験 結 果

3-1 雪混入量と粘度計指度変化の関係

各回転速度毎に雪混入率を変え、粘度計指度の変化を調べた。図-6に例として回転数 $N = 6 \text{ rpm}$ の場合を示した。雪混入量 W_s は 10 g から 80 g まで変えた。図から明らかなごとく、雪混入量の増加に対して、粘度計指度 θ は直線的に増加する。この場合雪混入量 0 g に相当するところは、 0°C の水の粘性係数 η を示すことになる。このグラフから(3)式にしたがって計算すると $\eta = 1.628 \text{ cp}$ であり、理科年表から求めた値 $\eta = 1.794 \text{ cp}$ とほぼ一致する。しかしロータの回転数によっては、表-1に結果をまとめたものを見ると負の粘性係数を示す場合もあり、雪混入量 0 の場合、すなわち水の粘性係数の測定には、別の種類のロータを選ばなければならないということになる。したがって本実験では、雪混入量 10 g から 100 g の場合の雪混入量と粘度計指度の回帰式を $\theta = a + b \cdot W_s$ として、各係数の a 、 b と相関係数 r を表-1にまとめた。表-1から、ロータの毎分回転数が $6 \sim 60 \text{ rpm}$ の早い場合に相関係数が高く、回転数が $0.3 \sim 3 \text{ rpm}$ の遅い場合に相関係数が低いという結果となった。これは回転数が遅い場合は測定回数が少ないことによるものと考えられる。係数 a については、前述したようにあまり意味はない。また回転速度 (N)、せん断速度 (D) 及び雪混入量 (W_g) における粘度計指度 (θ)、せん断応力 (S) をまとめて表-2に掲げた。

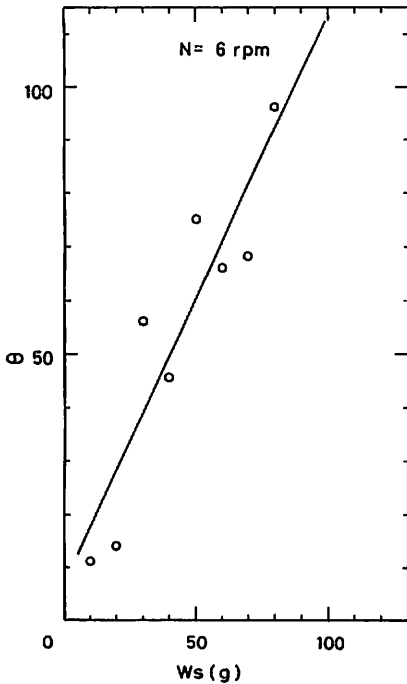


図-6 雪混入量に対する粘度計
粘度計指度変化 ($N = 6 \text{ rpm}$ の
場合)

Fig. 6 Dial reading (θ) plotted
against the amounts of snow
(W_s) in the case of $N = 6 \text{ rpm}$.

表-1 雪混入量による粘度計指度変化を
表わす関係式 $\theta = a + b \cdot W_s$ の係数 (a , b)
の値

Table 1 Constant values (a , b) in for-
mula of $\theta = a + b \cdot W_s$.

N	a	b	r
60	7.49	0.83	0.991
30	14.21	0.76	0.941
12	21.85	0.68	0.811
6	7.19	1.06	0.910
3	-16.31	1.55	0.936
1.5	-2.88	0.97	0.681
0.6	4.02	0.59	0.607
0.3	-7.77	0.52	0.548

θ : 粘度計指度 W_s : 雪混入量(g)

N: 回転速度(rpm) r : 相関係数

表-2 各回転速度(N), せん断速度(D)及び雪混入量(Ws)における粘度計指数(θ)及びせん断応力の値(S)

Table. 2 The values of dial reading (θ) and shear stress (S) against the various speed of rotation (N) and shear speed(D).

$\frac{N}{D} \setminus W_s$		10	20	25	30	40	50	60	70	75	80	90	100
60	θ	12.1	23.1	27.8	38.2	42.6	48.8	56.8	61.4	73.6	76.8	77.3	91.8
14.64	s	3.61	6.88	8.28	11.38	12.69	14.54	16.93	18.30	21.93	22.89	23.04	27.36
30	θ	12.8	21.5	44.0	36.0	56.7	57.1	59.5	60.8	63.5	82.3	91.2	82.1
7.32	s	3.81	6.41	13.11	10.73	16.90	17.02	17.73	18.12	18.92	24.53	27.18	24.47
12	θ	14.8	30.5	28.4	42.0	81.7	58.3	58.7	76.4	77.7	77.8	92.2	63.5
2.928	s	4.41	9.09	8.46	12.52	24.35	17.37	17.49	22.77	23.15	23.18	27.48	18.92
6	θ	11.2	13.8	-	56.3	45.7	75.1	66.0	68.3	-	96.3	-	-
1.464	s	3.34	4.11	-	16.76	13.62	22.36	19.65	20.24	-	28.70	-	-
3	θ	-	-	-	19.0	43.9	78.7	81.0	95.5	-	96.2	-	-
0.732	s	-	-	-	5.66	13.08	23.45	24.14	28.46	-	28.67	-	-
15	θ	-	-	-	13.7	27.9	60.7	70.3	84.7	-	45.6	-	-
0.366	s	-	-	-	4.08	8.31	18.09	20.95	25.24	-	13.59	-	-
0.6	θ	-	-	-	-	16.6	57.9	27.4	44.4	-	38.6	80.9	52.9
0.1464	s	-	-	-	-	4.95	17.25	8.17	13.23	-	11.50	24.11	15.76
0.3	θ	-	-	-	-	11.7	28.9	-	18.3	-	11.6	69.4	37.2
0.0732	s	-	-	-	-	3.49	8.61	-	5.45	-	3.46	20.68	11.09

各値の単位; W_s (g), N(rpm), D(s^{-1}), θ (指針の読み), S(Pa)

3-2 スノージャムの流動曲線

表-2から, 各雪混入量をパラメータとして, ロータの回転速度による粘度計の指数変化の関係を図に示すと, 図-7のようになる。ロータの回転速度が0.3~3 rpmまでは急増し, 6~12rpmで急減し, 60rpmまではほぼ一定値をとる。 θ の急減はロータとスノージャムの試料との間に滑りが生じたと考えられるので, これからの議論は, 回転速度の遅い0.3~3 rpmのデータについてのみ解析することにする。ただし, 0.3~3 rpmの遅い回転速度では, 1回の測定時間がかなりかかるということから測定回数が少なかったため, より精度を上げるために更に雪混入量40, 50, 70 gについて測定回数を増し, 表-3の結果を得た。

表-3 各せん断速度及び雪混入量におけるせん断応力の値

Table. 3 The values of shear stress(S) against the various shear speed(D) and amount of snow(W_s).

D \ W_s	40	50	70
0.0732	4.74	6.87	10.31
0.1464	8.46	13.47	12.37
0.363	12.49	16.51	21.00
0.732	16.99	19.53	22.10

D:せん断速度(s^{-1}) W_s :雪混入量(g)

表-4 せん断速度(D)とせん断応力(S)を表わす関係式 $\log S = a + b \cdot \log D$ の係数(a, b)の値

Table. 4 Constant values(a,b) in formula of $\log S = a + b \cdot \log D$.

W_s	a	b	r
40	1.32	0.54	0.986
50	1.39	0.42	0.931
70	1.43	0.36	0.968

s:せん断応力(Pa) D:せん断速度(s^{-1})
 W_s :雪混入量(g) r:相関係数

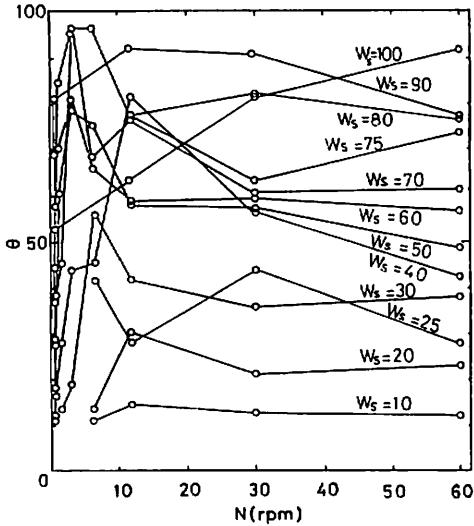


図-7 各雪混入量における回転速度に対する粘度計指度変化
 Fig. 7 Dial reading(θ) plotted against the speed of rotation(N) and parameterized for various amounts of snow(W_s).

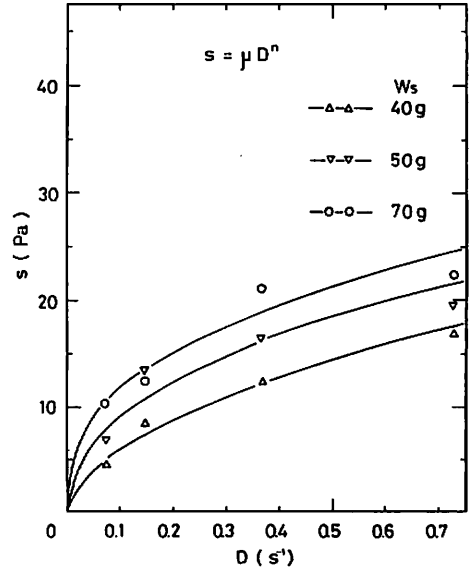


図-8 せん断応力(S)とせん断速度(D)の関係
 Fig. 8 The relationship between shear stress(S) to shear rate(D).

以上より、粘度計指度と回転速度をせん断応力 (S) とせん断速度 (D) になおし、それとの関係をみた流動曲線が図-8である。

図-8から、S-Dの関係が直線ではなく、かつ原点を通る傾向を示すことから、非ニュートン性流体で擬塑性と判別される。非ニュートン性流体の場合の流動方程式(3)式は次の(4)式で表わされる。

$$S = \mu D^n \quad (4)$$

ここで μ は、流体が非ニュートン性とした場合の粘性係数である。したがって、(3)式と(4)式から、見かけの粘性係数 η_a を考えれば、次の(5)式が得られる。

$$\eta_a = \mu D^{n-1} \quad (5)$$

この見かけの粘性係数 η_a とせん断速度Dの関係を示すと図-9になる。ここでnは指数で、 $0 < n < 1$ の範囲の値をとる。また図中の雪混入量40gは体積率約10%であり、70gは15%に相当する。

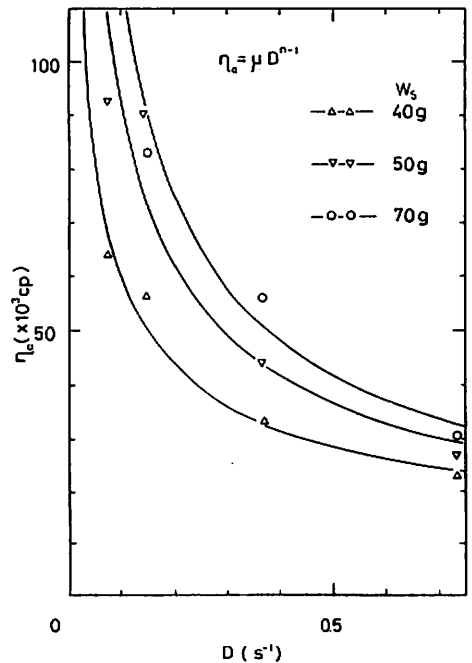


図-9 みかけの粘性係数(η_a)とせん断速度(D)の関係
 Fig. 9 The relationship between apparent viscosity(η_a) to shear rate(D).

IV あ と が き

雪と水の二相混相状態のスノージャムの粘性係数の測定を試みた。しかし、今回使用した測定装置は、均一流体用の回転粘度計（通称B型粘度計）であり、実際のスノージャムは均一状態とは考えられないので、得られた粘性係数はあくまでも見かけ上の粘性係数と解釈すべきであろう。

さらに、もう一つの問題としては、せん断速度が $0.1\sim 0.85\text{ S}^{-1}$ の小さな値の範囲しか測定できなかった。これより大きなせん断速度の範囲では、ロータとスノージャムの試料の間に滑りが生ずると考えられる。すなわち、ロータと試料の間に薄い水膜層が存在すると思われるが、この場合の水の粘性係数は通常の水の粘性係数より大きい。今後は、ロータの形状の改良を行い、大きなせん断速度の範囲でも測定できる装置を開発したい。

また、今回のスノージャムは、自然界では限られた条件にしか存在しないものである。スノージャムの状態を雪混入量として表わしたが、見かけ密度とか含水比など、さらには雪粒又は雪塊の大きさなどがパラメータとして必要であろう。小林（1985）はスノージャム状態の雪を水潤雪と呼んでそのベーンせん断力の測定を行っているが、こういった水潤雪の雪質をいかに表現するかもこれからの残された問題である。

最後に、本研究を行うに当たり、新潟県長岡市にある国立防災科学技術センター、雪害実験研究所の栗山弘前所長、熊谷第一研究室長にお世話になった。ここに記して感謝の意を表す。また本研究は昭和61年度新潟大学工学部土木工学科の卒業研究として、著者の中の阿部真一（現山形県庁）・斎藤龍夫（現新潟県庁）が行ったものを一部まとめたものである。

文 献

- 木下誠一（1963）：0℃の水に浸した雪の圧縮 I。低温科学，物理編，21，13-22。
小林俊市（1985）：湿潤雪のベーンせん断強度(1)ーベーンせん断強度と水潤時間の関係ー。雪氷，47(2)，55-62。
柳沢信房（1957）：レオロジーの基礎理論ー変形と流れー。コロナ社，東京。
藤岡敏夫・田端忠司・木下誠一（1963）：尾瀬沼スノージャム調査。低温科学，物理編，21，95-115。