



Title	流動状態の雪の研究 : 流動状態の雪の粘性係数と熱伝達係数
Author(s)	西村, 浩一; 前野, 紀一
Citation	低温科学. 物理篇, 36, 93-102
Issue Date	1979-03-10
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18358
Type	bulletin (article)
File Information	36_p93-102.pdf



[Instructions for use](#)

流動状態の雪の研究 II*

— 流動状態の雪の粘性係数と熱伝達係数 —

西村 浩一

(日本気象協会北海道本部)

前野 紀一

(低温科学研究所)

(昭和53年10月受理)

I. ま え が き

氷粒子と空気とが相互に複雑な運動をしつつある雪、いわゆる「流動状態の雪 (fluidized snow)」の研究は、降り積った雪が風によって再び舞い上る地吹雪や、斜面を流れ下る雪崩、あるいはもっと他の一般に運動しつつある雪の現象を解明する上で重要である。筆者達は、このような流動状態の雪を実験室でつくりだすことによって、その発生条件と一般的性質を詳しく調べ、流動状態の雪が多くの点で液体的性質を示めずことに注意した¹⁾ (以後、参考文献(1)は「論文I」と書く)。

液体の最も特徴的な性質の一つに、速やかな輸送現象がある。物質の拡散や熱の伝達が液体の中で急速に行なわれるのは、激しい分子運動の結果であるから、氷粒子と空気が相互に運動している流動状態の雪の中でも、各種の輸送現象が有効かつ急速に行なわれている可能性がある。本論文は、この点を明らかにすることを目的とし、流動状態の雪における運動量輸送の目安として粘性係数を、そしてエネルギー輸送の目安として熱伝達係数を測定した。

II. 測 定

雪の流動状態を生成するための装置については、論文Iに述べた。また、粘性係数と熱伝達係数の測定は、粒径を揃えたしまり雪、霜およびあられについて行なわれたが、各々の試料の顕微鏡写真と粒径分布曲線も論文Iに示した。

1. 粘性係数の測定

流動状態の雪の粘性係数は、改良した Stormer 型粘度計 (上島 VR-801) で測定された。粘度計の略図を第1図に示す。パドルの寸法は、雪を入れる管の内径 (4.0 cm) を考慮し、幅 3.5 mm、長さ 13.0 mm とした。このパドルに質量 10 g の錘を使って一定トルクを与え、100回転するのに要する時間 (t_{100}) を測定した。一方、あらかじめ粘度計校正用の標準液を使い、 t_{100} と絶対粘性係数との関係を調べておけば、測定された t_{100} の値から、流動状態の雪の粘

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1977号

性係数を求めることができる。

第2図は、この実験に用いたパドルに関する t_{100} と粘性係数 (η) との関係である。両者は、われわれが行なった実験範囲で、一次の関係にあるとみてよい。

2. 熱伝達係数の測定

流動状態の雪の熱伝達係数は、次のような非定常状態における方法で測定された。中心部に太さ 0.3 mm の銅・コンスタンタン熱電対を埋めこんだ直径 6.0 mm の真鍮球 (密度 $\rho=8.21 \text{ g/cm}^3$, 比熱 $C_p=9.00 \times 10^{-5} \text{ kcal/g} \cdot \text{deg}$) を液体窒素を使って約 -80°C に冷却し、これを流動状態の雪の中に挿入する。中心温度 (θ) の上昇をペン書き記録計で記録すれば、その曲線から熱伝達係数が計算できる。

球の表面温度が θ_s でまわりの温度が θ_a の時、時間 dt の間に周囲と dQ の熱のやりとりがあったとすれば、熱伝達係数 h は

$$dQ = hA(\theta_a - \theta_s) dt \tag{1}$$

と定義される。 A は球の表面積である。球が小さく、半径方向に温度勾配がほとんどないとすれば、 θ_s は球の中心温度に等しいと考えることができる。したがって、時間 dt の間に温度が $d\theta$ だけ変化したとすれば、

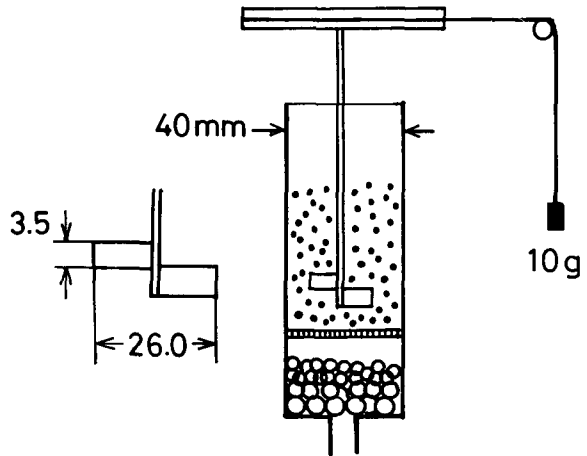
$$dQ = \rho C_p V d\theta \tag{2}$$

でなければならない。 V は球の体積である。第(1)式と第(2)式を等しいと置き、 $t=0$ の時 $\theta = \theta_b$ として積分すると、

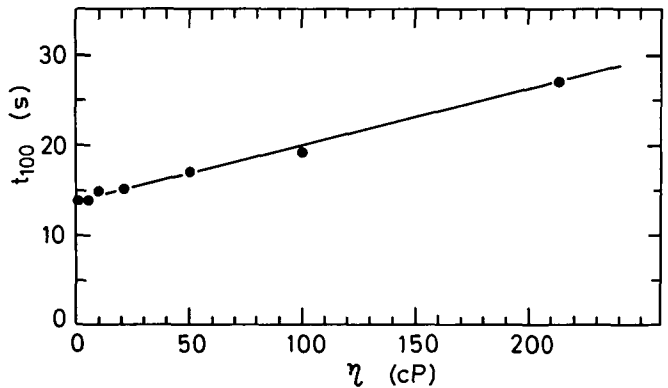
$$\ln \frac{\theta_a - \theta}{\theta_a - \theta_b} = \frac{hAt}{\rho C_p V} \tag{3}$$

を得る。

第(3)式において $A, \rho, C_p, V, \theta_a, \theta_b$ は既知であるから、規格化された球の温度変化の対数値を時間に対して目盛れば直線が得られ、その傾きから熱伝達係数が求まる。



第1図 粘性係数測定装置の略図。左はパドルの拡大図

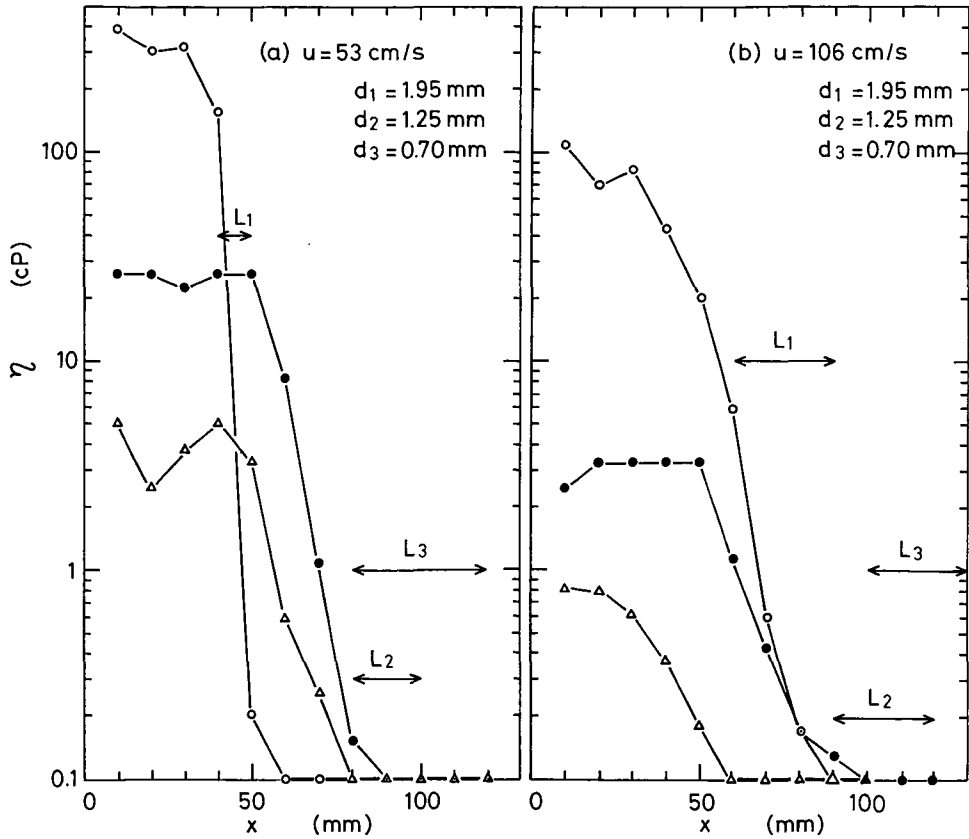


第2図 パドルが100回転するのに必要な時間 (t_{100}) と絶対粘性係数 (η) との関係

III. 粘性係数の測定結果

論文 I で述べたように、静止状態にある雪に下から空気を吹きこみ流動化させると、雪全体の体積は膨張する。しかし、氷粒子の空間密度は上から下まで必ずしも一様ではない。この効果は、粘性係数の実測値にも現われることが予想される。

第 3 図には、支持板からの距離が x の位置にパドルを置いて測定した粘性係数 (η) を、 x と粒径 (d) の関数として目盛った。 L_1, L_2, L_3 は流動状態の雪の上面の変動幅を示す。図から明らかのように、流動状態の雪の内部では、粘性係数はほぼ一定値を示している。しかし、流動状態の雪の上端に近づくとき粘性係数の値は急激に減少し、空気に近い値になる。これは、上端部における粒子空間密度のわずかな減少によるものと考えられる。



第 3 図 粘性係数 (η) の深さによる変化。 x は支持板からの距離、 L は流動状態の雪の上面の位置の変動幅を示す。温度は -14.0°C である

第 4 図は、 $x=30$ mm における粘性係数の測定結果を流速に対して目盛った図である。粒径と雪質の違いによって、粘性係数の値は異なるが、すべての場合、流速の増加とともに減少するという傾向が現われている。

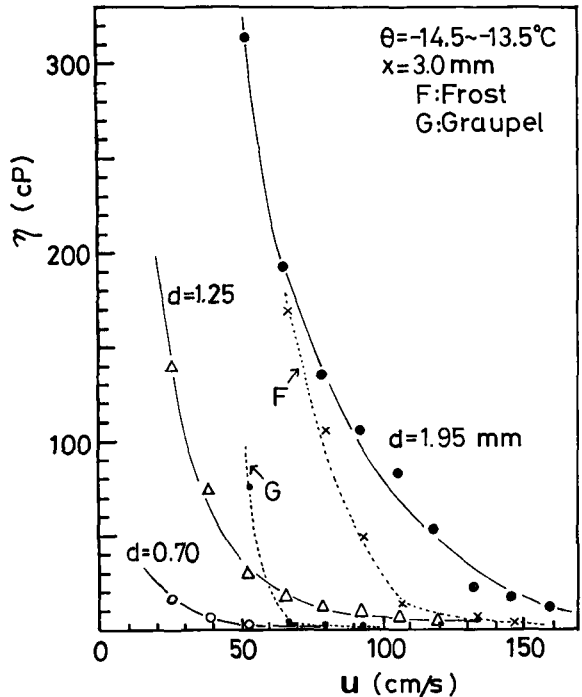
流動状態の雪の粘性係数を決める因子としては、空気流による乱流抵抗の他に、加速された氷粒子の衝突による運動量輸送が考えられる。流速が増せば、氷粒子の運動エネルギーが増

加するから、粘性係数は増加することが期待される。しかし、第4図に示めたごとく、流動状態の初期、粘性係数が急速に減少するという結果は、初期の流動状態の雪における粘性係数が、氷粒子の運動エネルギーの増加よりも、粒子の空間密度の減少による影響を多く受けることを意味している。

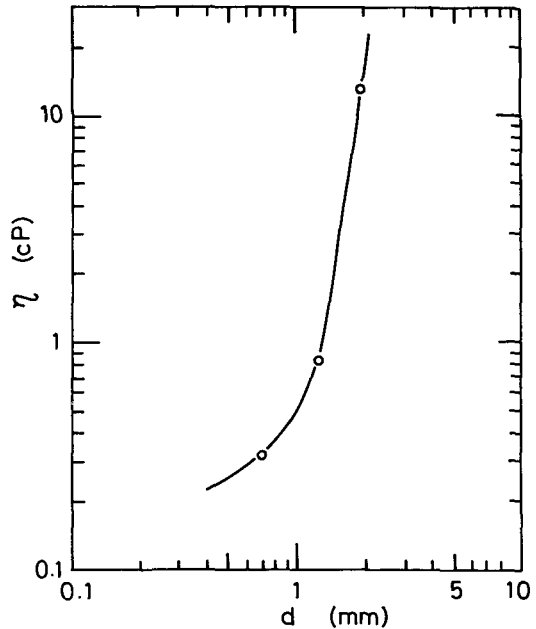
一方、流速が大きくなると、粘性係数がほぼ一定値になるという結果は、十分に流動状態が発達した段階で、粒子の可動空間の増大による粘性係数の減少分と、粒子の速度増加に伴うパドルとの衝突回数および運動量輸送の増加とがほぼ釣り合っているためと解釈できる。

第4図において、粘性係数の値は粒径の増加とともに増えている。流動状態が十分発達した時の粘性係数を粒径に対して目盛った(第5図)。粒径 $d=1.25$ mm の雪の値は $\eta=0.83$ cP であるが、これは $+25^{\circ}\text{C}$ の水の値とほぼ等しい。

再び第4図において、FとGは、それぞれ霜とあられを流動状態にした時の粘性係数の測定結果である。霜の試料の粒子の形は複雑であるが(論文Iの第3図(b)参照)、粒径は $d=1.95$ mm より大きいものが含まれている。しかしながら、粘性係数の値は $d=1.95$ mm の雪の値よりも小さい。粒子の形が粘性係数に与える影響に関しては、Matheson²⁾と古川・大前³⁾の研究があるが、両者の結果は一致していない。しかし、われわれの測定結果は、Mathesonの結果、すなわち粒子の形が複雑なために疎充填となり、その結果粘性係数



第4図 粘性係数(η)と流速(u)との関係。パドルの位置は $x=30$ mm, 温度は $\theta=-14.5\sim-13.5^{\circ}\text{C}$ である

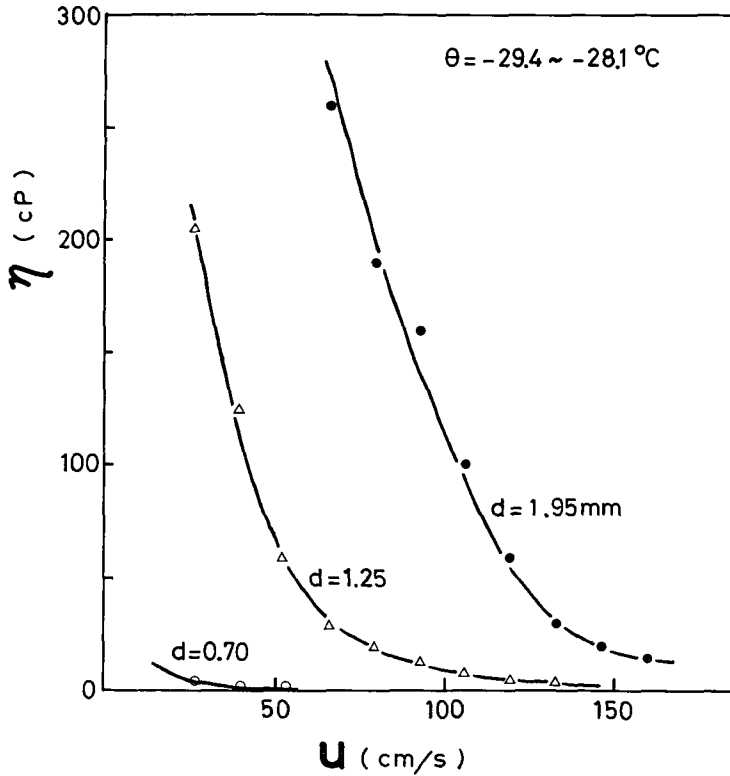


第5図 粘性係数(η)と粒径(d)との関係。温度は $\theta=-14.5\sim-13.5^{\circ}\text{C}$ である

が減少するという説明を支持しているようにみえる。

論文 I で、あられのような広い粒径分布を持つ雪試料を流動化すると、粒径によるふるいわけが行なわれると述べた。したがって、第 4 図に示めた $x=30\text{ mm}$ における測定結果は、必ずしも流動状態の起きている全領域の値を反映していない。粘性係数の値は、下部ほど大きく、上部ほど小さいことが予想される。

第 6 図は、温度が $\theta = -29.4 \sim -28.1^\circ\text{C}$ の範囲で測定した粘性係数と流速との関係である。粘性係数と流速および粒径との関係は、第 4 図の場合とおおよそ等しい。



第 6 図 低温域における粘性係数 (η) と流速 (u) との関係。パドルの位置は $x=30\text{ mm}$ である

IV. 熱伝達係数の測定結果

第 7 図は、直径 6.0 mm の真鍮球の中心温度を規格化し、その対数を時間に対して目盛った図である。流速が零の時でも $u=132\text{ cm/s}$ の時でも、また雪があってもなくても、両者は直線関係にあり、第 (3) 式を用いて熱伝達係数を求めることが可能であることを示めている。また、この図からは、同じ流速でも、雪が存在して流動状態になっていると、球と外界との間の熱伝達が極めて活発になることが理解される。

第 8 図には、第 7 図に示めたような直線の勾配から求めた熱伝達係数 (h) を支持板からの距離 (x) の関数として目盛った。流動状態の雪の主要部分 (下部) では、熱伝達係数は $h=$

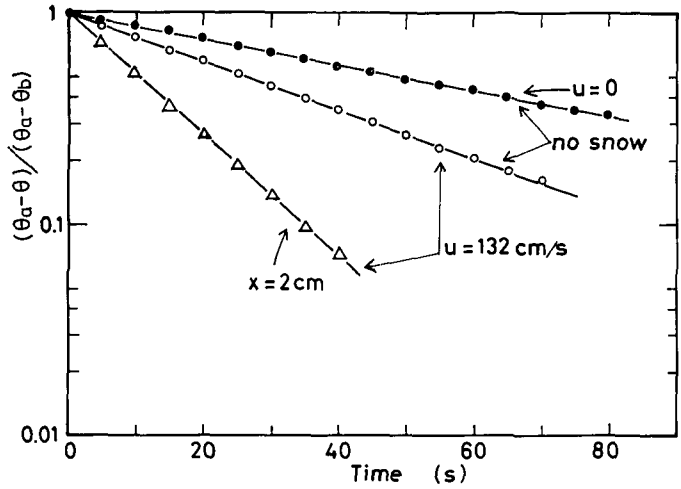
150 kcal/m²·hr·deg 程度のほぼ一定値となっている。しかし、上部へゆくに従って、値は減少し空気のみの方の値に近づく。

この一般的傾向は、第3図に示めた粘性係数の場合と似ている。しかし、流動状態の雪の上端部に近づいた時の熱伝達係数の減少の仕方は、粘性係数の場合に比べると非常に緩慢であり、氷粒子の空間密度の寄与は両者においてかなり異なることがわかる。

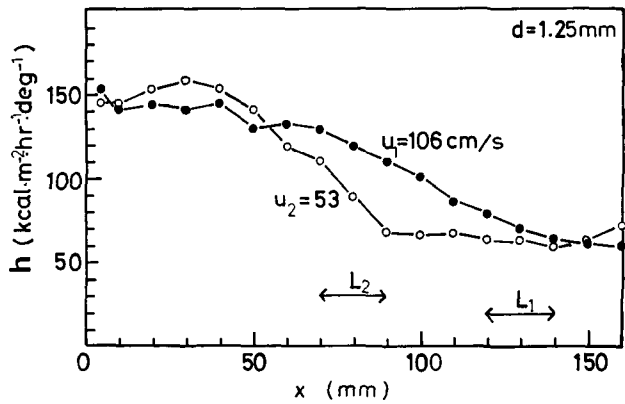
熱伝達係数と流速との関係を第9図に示す。雪を入れないで空気だけを流した時の熱伝達係数の測定値は、流速の極めて小さい時を除き、おおよそ破線の上ののっている。破線は、Rantze・Marshall⁴⁾が強制通風のもとで得た理論および実験式、

$$Nu = 2.0 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4)$$

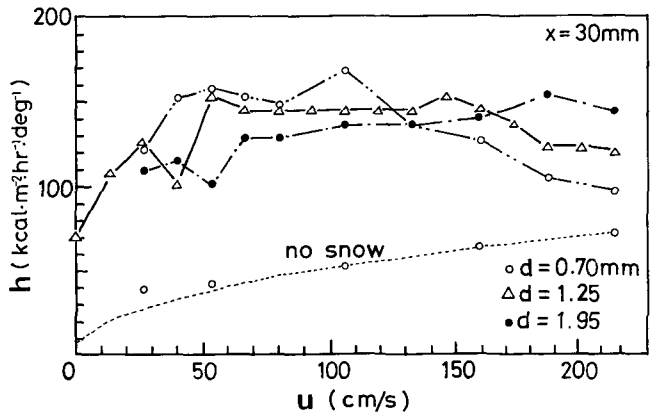
から計算した値である。ここで、 Nu はNusselt数、 Re はReynolds数、 Pr はPrandtl数であるが、真鍮球の直径を D 、空気の熱伝導度、比熱、密度および粘性係数を、それぞれ k_a 、 C_a 、 ρ_a および η_a とすれば、これらの無次元量は、



第7図 真鍮球の中心温度(θ)の時間変化。周囲の温度は $\theta_a = -15.1^\circ\text{C}$ 、中心温度の初期値 $\theta_b = -50.0^\circ\text{C}$ 、雪の粒径 $d = 1.25\text{ mm}$



第8図 熱伝達係数(h)の深さによる変化。 x は支持板からの距離、 L は流動状態の雪の上面の変動幅を示す



第9図 熱伝達係数(h)と流速(u)との関係。破線はRantze・Marshallの式から計算した値である

$$Nu = \frac{hD}{k_a}, \quad Re = \frac{D\rho_a u}{\eta_a}, \quad Pr = \frac{C_a \eta_a}{k_a} \quad (5)$$

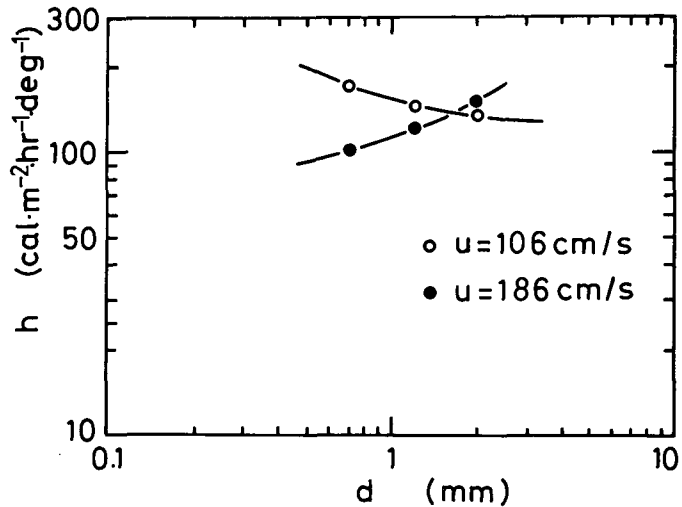
と定義される。

第9図において、最小流動化速度 (u_{mf}) より小さい流速における熱伝達係数は、静止状態の雪についての測定値である。値は、流速の増加とともに、ほぼ直線的に増大している。また、この図において、 $d=1.25$ mm と 1.95 mm の雪の u_{mf} 付近の値が小さいが、これは、真鍮球を雪の層に挿入することにより、不安定になっていた粒子が球の周囲だけ部分的に飛散してしまうためと考えられる。この時、球の周囲で完全に流動化がおり、氷粒子が球に衝突すれば、 h は増加するはずであるが、実際には球の下半分だけが有効表面となり、そのために h が減少したと解釈できる。

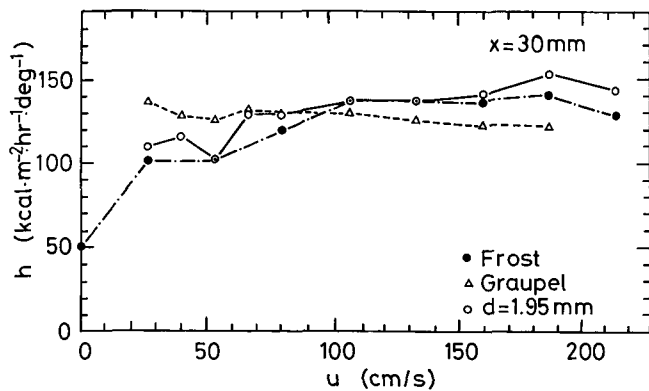
第10図に、熱伝達係数と粒径との関係を示めた。粒径が増加すると、一般に粒子の衝突回数が減少するため、熱伝達係数は減る。ただし、粒径が大きいほど体積膨張比が小さいから (論文I参照)、ある流速以上ではこの関係が逆になる。図の $u=186$ cm/s がその場合に相当する。

第11図は、霜とあられを流動化した時の熱伝達係数の測定結果である。比較のため $d=1.95$ mm のしまり雪の値も目盛っている。霜の熱伝達係数の値が小さめなのは、粘性係数の場合と同じように、結晶の形が複雑なため球との接触が少ないこと、および流動化しても自由な運動が妨げられることなどによると考えられる。

あられの場合、非常に大きな粒子を含んでいるにもかかわらず、熱伝達係数の値はそれほど大きくない。したがって、この場合、粘性係数の場合と同じように、粒子のふるいわけの効果が現われていると解釈す



第10図 熱伝達係数 (h) と粒径 (d) との関係

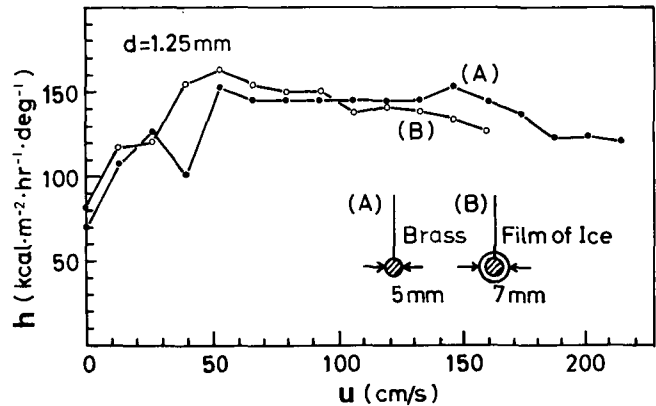


第11図 霜とあられの熱伝達係数 (h)

べきであろう。

これまででは、金属球の表面の熱伝達について測定を行なった。第12図は、氷膜で覆われた真鍮球の熱伝達係数である。氷膜は、冷却した真鍮球を水に浸して作った。真鍮球の直径は5.0 mm、氷膜の厚さは約1 mmである。この場合、氷膜の表面温度は球の中心温度と常には等しくないで、厳密に言えば第(3)式は使えない。しかし、目安

を得る目的でこの式を用いたところ、氷膜で覆うと熱伝達係数は幾分減少する傾向を示めすが、おおよその値は変わらないという結果が得られた。



第12図 氷膜で覆われた真鍮球の熱伝達係数

V. 考 察

流動状態の雪の内部では、氷粒子と空気が相互に激しい運動をしているのであるから、液体の分子運動との類似から類推して、輸送現象は極めて速やかに進行するであろうと最初に予想した。そして、この予想の正しいことが、粘性係数と熱伝達係数の測定によって証明された。

ここで得られた粘性係数は、一般の連続流体が持つ分子粘性係数とは少し性格が異なり、空気の分子粘性係数と乱流粘性係数の他に、氷粒子の衝突による効果も含んでいる。しかし、論文Iで詳しく論じたように、氷粒子の複雑な運動を、巨視的に見た時の液体の分子運動とみなすならば、ここで測定された粘性係数と液体の粘性係数との間には明瞭な類似が見い出される。

第13図は、第4図と第6図に示めた流動状態の雪の粘性係数(η)を、流速の逆数($1/u$)に対して目盛った図である。各々の粒径および温度における粘性係数は、2本の直線で構成されている。すなわち、粘性係数と流速の逆数との間には、 B と E を定数とすれば

$$\eta = B \exp(E/u) \quad (5)$$

という関係がある。一方、液体の粘性係数は、一般に

$$\eta = B' \exp(E'/RT) \quad (6)$$

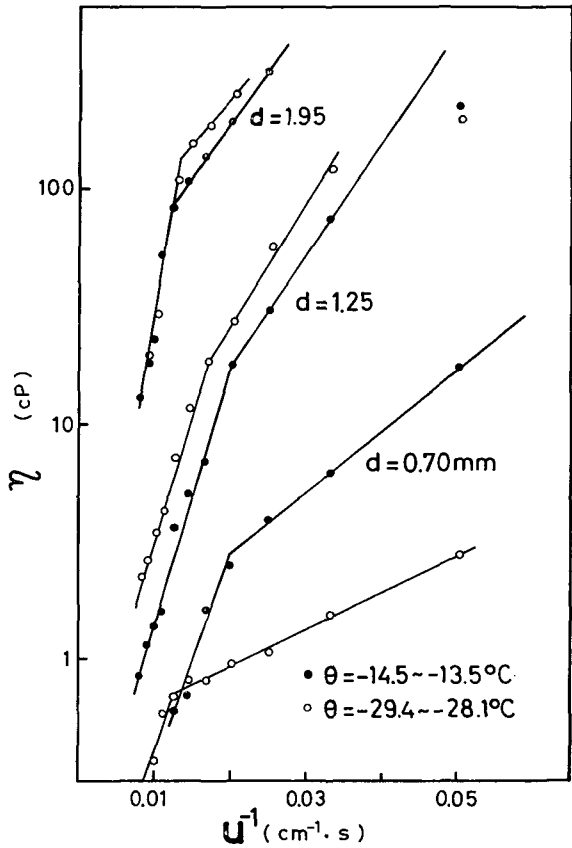
という形で表わされる⁵⁾。 B' は定数、 E' は活性化エネルギー、 R は気体定数である。流動状態の雪における流速は、物理的には液体の絶対温度に相当するから(論文I)、第(5)式と第(6)式は同じ形の式といえることができる。したがって、 E は、流動状態の雪における粘性係数の機構に関係する量であることが予想される。また、第13図において、すべての測定結果が2本の直線で表わされていることから、流動状態の雪の粘性には、少なくとも2つの異なった機構が関与していることが予想される。

完全に流動状態になった雪の熱伝達係数は、流速には無関係なほぼ一定値を示す。第9図の例でいえば、 $h=150 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{deg}$ 程度の値となっている。この値は、同じ図に示めした、雪の存在しない時の値よりも、約3倍大きい。熱伝達係数の増加の原因としては、氷粒子の衝突による熱交換の増大と氷粒子の存在による乱流熱拡散の増大とが考えられる。流速が増加しても h の値がほぼ一定値に保たれるのは、上の増大の原因に対して、体積膨張による氷粒子空間密度の減少が相補しているためと考えられる。

流動状態の雪の上端部のすぐ上では流動状態の雪の内部の乱流がまだ保存されていると仮定すると、第8図と第9図から、上に述べた熱伝達係数を増大させる2つの寄与を見積ることができる。そのために、次の様な定義をする：

- h = 流動状態の雪の熱伝達係数
- h_a = 雪のない時の熱伝達係数
- h_{out} = 流動状態の雪のすぐ上の熱伝達係数
- $h_t = h - h_a$: 雪が流動状態になったための熱伝達係数の増加分
- $h_c = h_{out} - h_a$: 乱流熱拡散による熱伝達係数の増加分

h, h_a および h_{out} を第8図と第9図から求め、上の各量を計算した結果が第1表である。 h_t に対する h_c の比率は、流速が106 cm/s の時は9%、53 cm/s の時は23% を占める。その残りは、氷粒子の衝突によるものと考えられるから、流動状態の雪における熱伝達には粒子の衝突による熱交換が決定的役割をしているということが出来る。



第13図 粘性係数 (η) と流速の逆数 ($1/u$) との関係

第1表 熱伝達係数

流 速 (cm/s)	熱 伝 達 係 数 (kcal/m ² ·hr·deg)				
	h	h_a	h_{out}	h_t	h_c
53	153	43	68	110	25
106	145	53	61	92	8

本論文は、筆者の一人(西村)が北海道大学大学院理学研究科修士課程の課題として行なった研究をまとめたものである。お世話になった低温科学研究所の諸氏に感謝します。また、論文の図の作製に協力して頂いた大学院生の鴻野繁和君に感謝します。この研究に要した費用の一部は、文部省科学研究費補助金から支出された。

文 献

- 1) 前野紀一・西村浩一 1978 流動状態の雪の研究. I. 一流動状態の雪の生成とその一般的性質一. 低温科学, 物理篇, **36**, 77-92.
- 2) Matheson, G. L., Herst, W. A. and Hold, P. H. 1949 Characteristics of fluid-solid systems. *Ind. Engr. Chem.*, **41**, 1099-1104.
- 3) 古川淳二・大前 劼 1951 流動粉体の性質(第1報). 工業化学雑誌, **54**, 798-800.
- 4) Rantz, W. E. and Marshall, W. R. Jr. 1952 Evaporation from drops. *Chem. Engr. Sci.*, **48**, 173-180.
- 5) Moelwyn-Hughes, E. A. 1961 *Physical Chemistry*. 2nd revised edition, Pergamon Press, Oxford, 1334 pp.

Summary

In the preceding paper, Studies of Fluidized Snow. I, the nature of the fluidized snow was found to be similar to that of liquid. In the present paper some transport properties (viscosity and heat transfer) were investigated, which are considered to be very characteristic of liquid.

The apparent viscosity coefficient (η) of the fluidized snow was measured with a Stormer-type viscometer (Fig. 1). It was found that the viscosity coefficient decreased rapidly when the snow was fluidized (Fig. 4). The value was smaller for smaller diameters of snow particles and larger velocity of air flow. Logarithmic plots of viscosity coefficient against the reciprocal of air velocity gave a linear relationship with two different slopes in higher and lower velocity ranges (Fig. 13). This result suggests that at least two different mechanisms are working in the phenomenon of momentum transfer in the fluidized snow.

The heat transfer coefficient was determined by measuring the change of temperature of a brass sphere of 6 mm in diameter, which was previously cooled and suspended in the fluidized snow. The value of the heat transfer coefficient in the fluidized snow was by three or four times larger than that in an empty air flow (Fig. 9) The increase is considered to have been caused by a heat transfer due to frequent collisions of snow particles and enhanced turbulence of air flow.