

解説

雪の流動化と雪氷混相流

北海道大学低温科学研究所 前野 紀一

1. 雪の流動化

北国の生活や生産活動にとって雪の存在は悪影響のみを与えるものと考えられた時代があったが、近年はむしろ雪の特徴を生かし、より積極的に生活や生産に利用しようという気運が強い。この時、雪の動的特徴の把握は極めて重要と考えられる。というのは、これまでの雪の研究の中で、運動しつつある雪、すなわち流動雪に関する研究は少ないが、多くの雪氷現象の中で流動雪の果す役割は大きく、またその積極的活用も予想されるからである。

地面に積った雪は、構造は雪粒子と空気の混合物ではあるが、一般に一塊りの固体とみなしてよい。なぜなら多くの場合、各々の雪粒子間には氷の結合が発生してしっかりとした構造を保っており、米粒や砂粒のような単なる粒子混合物ではないからである。しかし、このような雪も、なんらかの原因で粒子間の

結合が破壊されると、米粒や砂粒と同じような状態になる。これが雪の流動化現象であり、吹雪や雪崩がその典型例である。

流動雪の構造や物性は、図1の方法で調べられている(前野・西村, 1978)。内径40mmのアクリル管(A)には粒径をそろえた雪粒子が詰められ、底の多孔支持板を通して一定流速の空気が送られる。流速がある臨界値を超えた時、流動化の開始が期待される。

圧力変換器(D)で測定された雪試料通過による気流の圧力損失を図2に示した。温度 -14.1°C の図2(a)の実験において、流速を次第に増加すると(A → B)、圧力損失も次第に増加するが、雪は流動化しない。そこで任意の点(C)で装置に機械的な衝撃を与えたところ、雪は一瞬にしてばらばらに分散し、流動状態になった。このとき圧力損失は瞬間に一定値に向って減少した。この一定値は雪の全重量(w)を管の断面積(s)で割った値(w/s)に等しい。以後流速を増しても(D → E)、圧力損失は変化しない。次に流速を減少させると、F点で流動化が停止した。

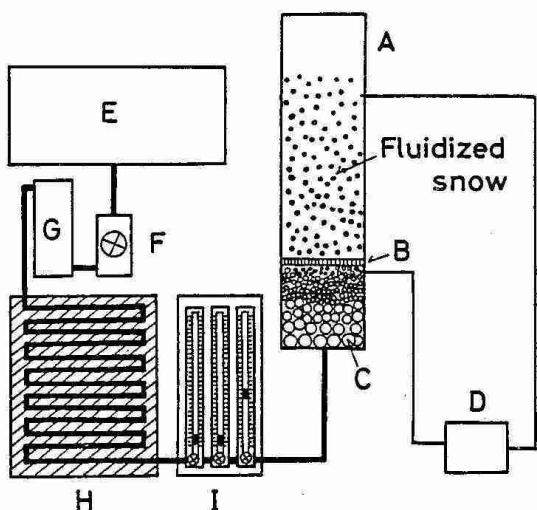


図1 雪の流動化実験装置

A : アクリル管, B : 多孔支持板, C : ガラス球,
D : 圧力変換器, E : コンプレッサー, F : 減圧器,
G : 除湿器, H : 恒温槽, I : 流量計

ころ、雪は一瞬にしてばらばらに分散し、流動状態になった。このとき圧力損失は瞬間に一定値に向って減少した。この一定値は雪の全重量(w)を管の断面積(s)で割った値(w/s)に等しい。以後流速を増しても(D → E)、圧力損失は変化しない。次に流速を減少させると、F点で流動化が停止した。

温度が -30.6°C の図2(b)の場合、流速を増してゆくとC点で自然に流動化が始まり、圧力損失はやは

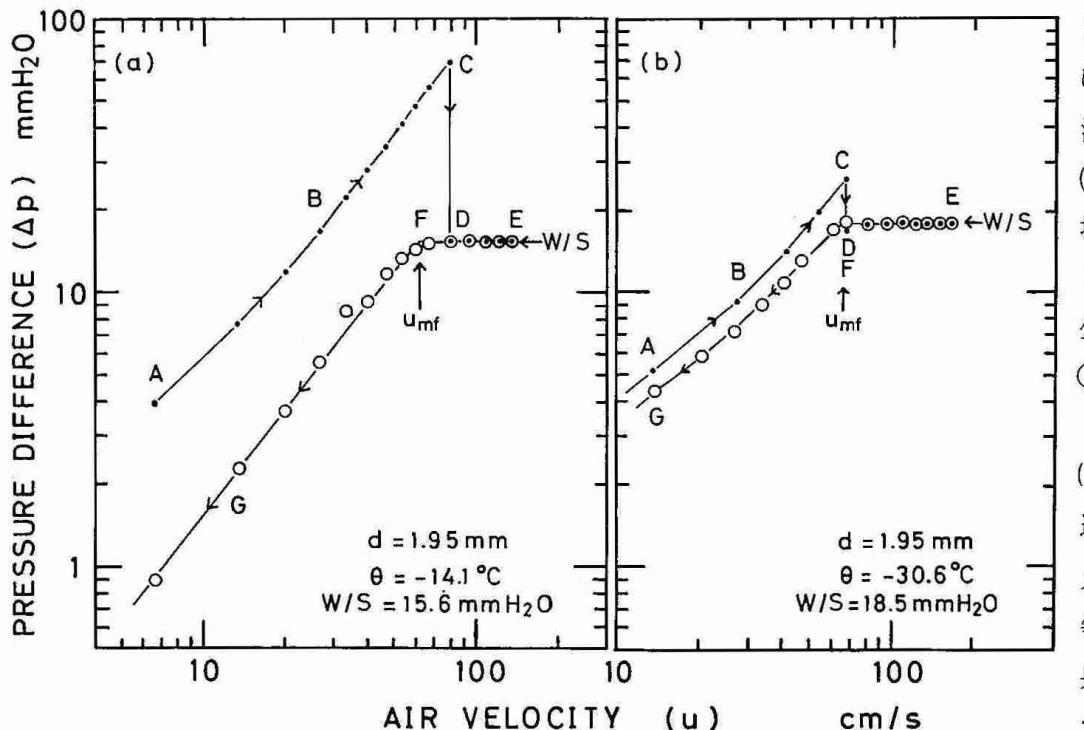


図2 圧力損失と流速の関係

a) 温度 -14.1°C , b) 温度 -30.6°C , d は粒径, θ は温度, W は雪の重量, S は管の断面積。実験は $A \rightarrow B \rightarrow C \dots$ の順序で行なわれた。

り一定値 (w/s) になった。流速減少時の様子は (a)の場合も(b)の場合も同様で、F点の流速が最少流動化速度 (u_{mf}) である。重要な点は、(a)ではC点の流速が u_{mf} より大きく、(b)では等しいという結果である。換言すれば、(b)では速度が最少流動化速度に達すると、流動化が自

然に始まるが、(a)ではなんらかの外的衝撃を与えない限り、流動化が始まらない。このような結果を与える原因が雪氷粒子間の結合である。この流動化実験は、雪粒子の粒径をふるいで揃え、管につめた直後行なわれた。しかし、(a)の高温 (-14.1°C) の実験では、焼結現象によってすぐに粒子間に氷の結合が成長し、上のような結果を与えたわけである。焼結による氷の結合の成長は時間の経過とともに進行するから、雪氷粒子の付着力は、温度や湿度だけでなく、経過時間の関数でもある。

2. 流動雪の特徴

図1の実験において、いったん流動化が開始すると、気流の供給が持続する限り雪の流動状態は維持される。流動雪の内部では、雪粒子と気流の動きは複雑な乱流状態にある（図3）。しかし、流動雪全体を巨視的な流体とみなすならば、この流体の巨視的な物性の定義と測定ができる。

その一例を図4に示す。これは、図1のアクリル管内部で測定した粘性係数である（西村、前野, 1978; Maeno et al., 1980）。粘性係数は改良したストーマー型粘度計を用いて測定された。測定結果は、雪粒子のはほとんど存在しない上部において、おおよそ空気の値 (-14°C で $1.65 \times 10^{-5} \text{ N s m}^{-2} = 0.0165 \text{ センチポアズ}$) を示し、下部の流動雪の部分では流速や粒径の違いによって、 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ N s m}^{-2} = 1 \sim 10^2 \text{ センチポアズ}$ の値を示している。水の粘性係数は 1.8 センチポアズ (0°C) であるから、流動雪の粘性係数は実質的にはおおよそ水程度と考えられ、雪崩に巻きこまれた人が「泳ぐ」ことには物理的にも意味がありそうである。

流動雪の特徴は、雪粒子と気流が激しい衝突運動を繰り返している点にある。その結果、流動雪内部では、一般に輸送現象の速度が速い。上述した粘性係数の増加は、雪粒子衝突による運動量輸送の増加とし

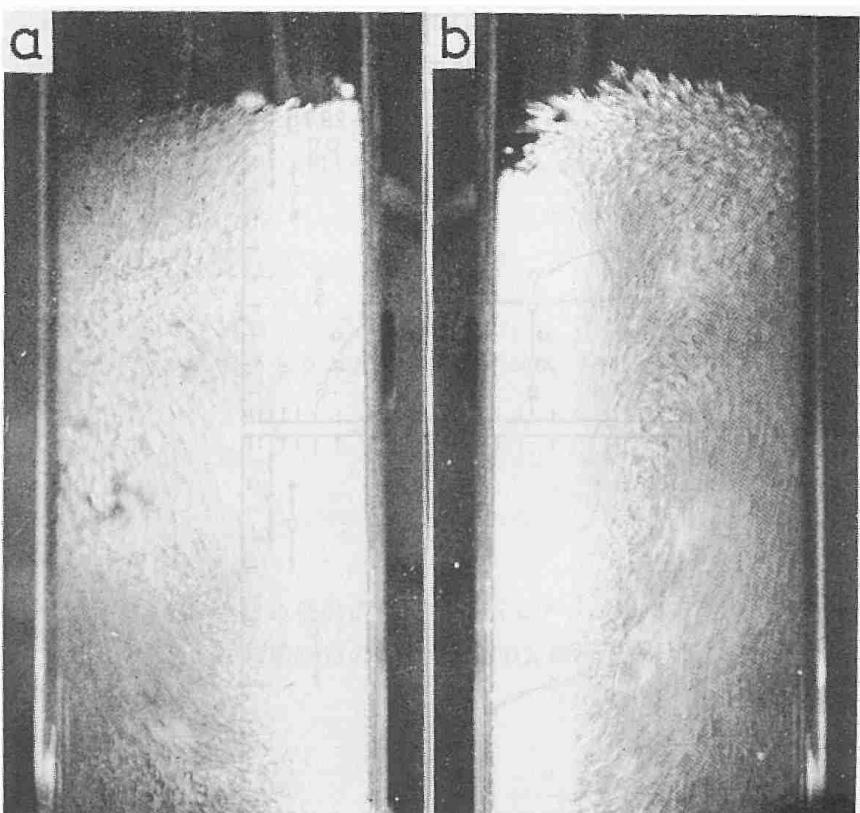


図3 流動雪の写真

雪粒子の粒径は 1.25 mm , 温度は -14.0°C

a) 流通 50 cm/s , b) 流速 60 cm/s

子としては雪でも氷でもよく、すなわち水蒸気の昇華凝結で生じた雪粒子でも、水の凍結で生じた氷粒子でもよい。また、流体も空気だけでなく、水やその他の流体の場合も考えられる。流体の違いに着目した雪氷混相流の分類を表1に示す。

混相流は、文字通り、2個以上の相からなる流体を意味し、これまで多くの研究分野で取扱われてきた。例えば、化学工学や機械工学の分野では、固気二相流、スラリー、固気液三相流等、また河川や土木の分野では、河川流砂、海岸漂砂、泥流、土石流、等がある。しかし、これらは雪氷混相流の場合と同様にそれぞれ独自の分野で研究されてきたきらいがある。このような情勢のもとで、今年7月には、日本混相流学会が設立されることになっている。これを契機に雪氷混相流の研究もより一層他分野との交流が盛んになるはずである。

参考文献

- 前野紀一, 1984 : 雪氷混相流. 混相流の流動のダイナミックスと応用技術. 日本学術会議水力学水理学研究連絡委員会混相流小委員会編, P. 35 - 49,
- 前野紀一・西村浩一, 1978 : 流動状態の雪の研究 I, 低温科学, 物理篇, 36, 77 - 92.
- Maeno,N., Nishimura,K. and Kaneda,Y., 1980 : Viscosity and heat transfer in fluidized snow, J.Glaciol., 26, No. 94, 263 - 274.
- 西村浩一・前野紀一, 1978 : 流動状態の雪の研究 II, 低温科学, 物理篇, 36, 93 - 102.

て理解できる。また、エネルギー(熱)輸送の増加も当然予想される。

3. 雪氷混相流

雪の流動化現象は、自然界に多数存在する。風の作用で発生する吹雪も、斜面を流れ下る雪崩も雪の流動化現象である。また、人工的流動雪も存在する。除雪中の雪や、路上の車輪の下の雪がその例である。これらの流動雪の特徴は、前述したように雪粒子と気流の複雑な運動にあり、多くの点で同じような取扱いが可能である。この点に注目して「雪氷混相流」という言葉が作られた(前野, 1984)。

雪氷混相流は、雪氷学で扱うすべての混相流を意味する。粒

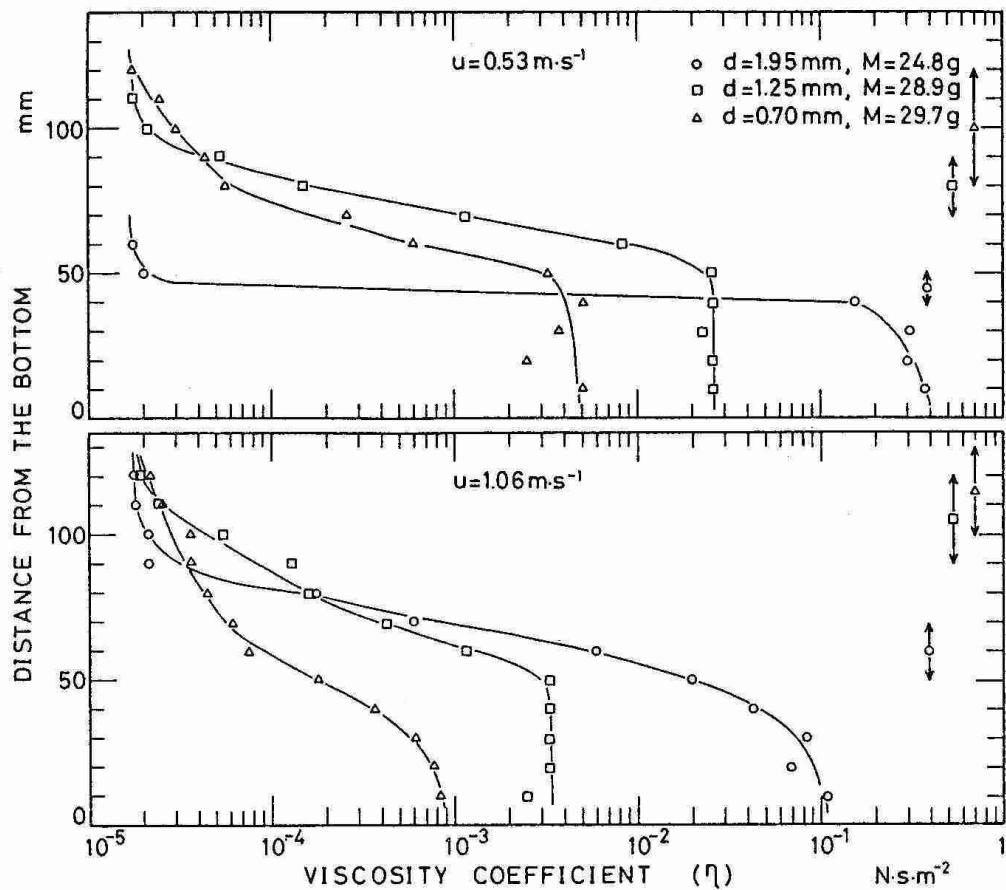


図4 流動雪の粘性係数

表1 雪氷混相流の分類

気相雪氷混相流	空気と雪氷粒子からなる雪氷混相流 例：雪崩，吹雪，降雪，除雪中の雪，等
	空気以外の気相と雪氷粒子からなる雪氷混相流 例：地球以外の惑星の降雪，土星の輪，等
液相雪氷混相流	水と雪氷粒子からなる雪氷混相流 例：フライジル・アイス，流雪溝，融雪流出（雪崩），等
	水以外の液相と雪氷粒子からなる雪氷混相流 例：雪氷粒子を含む掘削原油，等