



Title	流動状態の雪の研究 Ⅰ : 流動状態の雪の生成とその一般的性質
Author(s)	前野, 紀一; MAENO, Norikazu; 西村, 浩一 他
Citation	低温科学. 物理篇, 36, 77-92
Issue Date	1979-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18357
Type	departmental bulletin paper
File Information	36_p77-92.pdf



流動状態の雪の研究 I*

— 流動状態の雪の生成とその一般的性質 —

前野 紀 一

(低温科学研究所)

西村 浩 一

(日本気象協会北海道本部)

(昭和 53 年 10 月受理)

I. ま え が き

雪は、微量の水蒸気を含む空気と、複雑な形をした氷粒子とで構成された「二相混合物」である。これまで、雪に関しては数多くの研究が発表されたが、そのほとんどは、二相混合物の構成要素である空気と氷粒子が力学的に静止している場合のみを取扱い、種々の物理量の測定にあたっては、氷粒子や空隙の物理的、幾何学的配置が、測定によって変化しないことに特に注意が払われた。

しかし、現実の雪において、空気は常に静止しているのではなく、風は雪の中を多かれ少なかれ吹き抜けていると考えられる。また、吹雪や雪崩などの現象においては、粒子間の結合は切断され、氷粒子は空気とともに複雑な運動を行なっている。この場合は、氷粒子と空気が力学的に静止していないことが、むしろ最も重要な特徴である。しかし、このような、氷粒子と空気が相互に運動しつつある雪、すなわち「流動状態の雪 (fluidized snow)」については、これまでほとんど研究が行なわれなかった。

粉体を容器に入れ、底から流体を送り込むと、流速の小さなうちは、流体は粉体の隙間をくぐり抜けるだけであるが、流速がある臨界値を越えると、粉体は複雑な運動を始め、全体はあたかも流体のような様相を呈するようになる。この状態は、化学工学や粉体工学の分野では「流動層 (fluidized bed)」と呼ばれ、粉体の輸送、加熱、吸着、触媒反応などの極めて広い分野で利用されている¹⁾。

われわれは、この流動層の方法を応用して、流動状態の雪を生成し、その物理的性質を調べる研究に着手した。この研究の第 1 報である本稿では、流動状態の雪の生成方法とその一般的性質について報告する。

II. 実 験

1. 流動化装置

流動状態の雪を発生させる実験装置の模式図を第 1 図に示した。雪を入れる透明なアクリ

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 1963 号

ル円筒 (A) の太さは、内径 2 cm から 10 cm までの種々の寸法のものを使ったが、主な実験は内径 4.0 cm の管で行なわれた。

管に流れ込む空気流を均一化するため、管の下部には大小のガラス球 (C) を下から順次積み上げ、また雪を支える支持板 (B) には、直径 0.3 mm の多数の小孔を 1 mm 間隔の正方格子点にあけた。支持板は厚さ 1 mm のアクリル板である。支持板にあける孔の大きさと間隔によっては、雪が均一に流動化しないことがある。この孔の配置は、種々の孔径や間隔、あるいは各種の布や網を使ってのわれわれの試行錯誤の結果であるから、もっと良い孔の大きさと配置の仕方があるかもしれない。

管に送りこむ空気の供給源としては 10 気圧のコンプレッサー (E) を用いた。コンプレッサーを使ったのは、雪の流動状態を一定時間同じ状態に保つためには、空気を一定速度で送れる大容量の空気溜が必要なためである。コンプレッサーを出た空気は、5 気圧に減圧され (F)、除湿器 (G) で水分を除いてから、アルコール恒温槽 (荏原設備 ES-100) (H) の中の長さ約 20 m の銅管に導かれて、一定温度にされる。

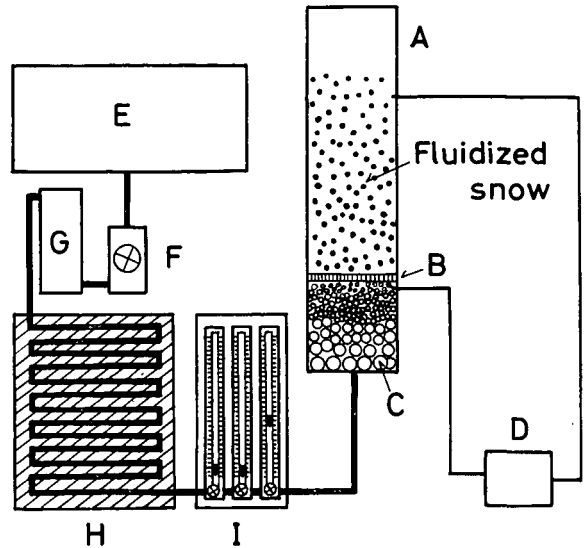
空気の流量は、面積流量計 (ロータメータ) (日本タイトフロー工業 FLO-PL-18 型) を 3 本並列に接続し (I)、広い範囲で一定値に保たれた。流量が一定でも、管内を流れる空気の実際の速度は、場所により、また粒子の存在の仕方によって異なる。以後本論文で用いる流速とは、流量を管の断面積で割った値、すなわち「濾過流速 (superficial filter velocity)」の意味である。

空気が管内の雪を通過し、雪を流動化させる時のエネルギー損失を調べるために、支持板の直下と十分上部との間の圧力差 (Δp) を測定した。圧力差の測定は、初めはアルコール・マンローメーターでも行なわれたが、多くはストレン・ゲージを用いた圧力変換器 (共和電業 PGW-A 型) (D) が使用され、値はペン書き記録計あるいは電磁型オシログラフで記録された。

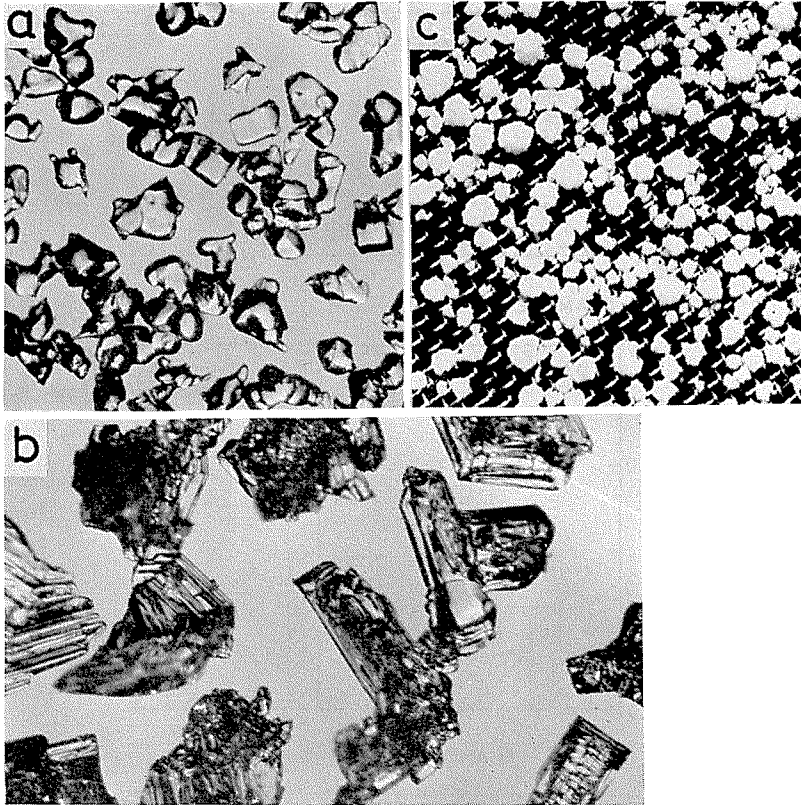
2. 雪の試料

流動化の実験には、しまり雪、霜、あられ、および樹枝状結晶の新雪、の 4 種類の氷粒子が用いられた。しかし、主な実験は、粒子の形の単純なしまり雪について行なわれた。

使ったしまり雪は、札幌近郊の中山峠に降り積った雪を約 1 年間 -15°C の低温室に保存したものである。このしまり雪を機械的にほぐし、粒径を揃えて実験の試料とした。粒径を揃えるためには、JIS 規格の 6 個のふるいを使った。ふるいの目の開きは、大きい方から 2.38 mm, 1.68 mm, 1.19 mm, 0.84 mm, 0.42 mm および 0.177 mm である。したがって、この順序に積



第 1 図 雪の流動化装置の模式図。A: アクリル管, B: 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



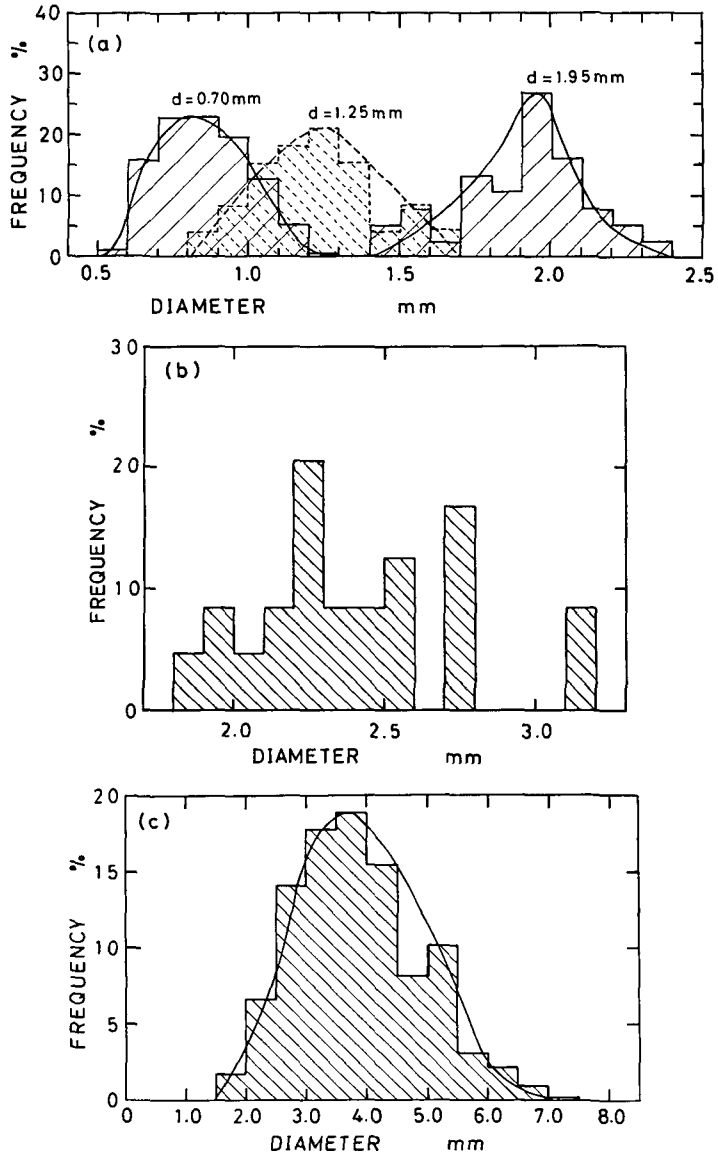
第2図 流動化実験に用いた雪の顕微鏡写真。(a) 機械的にほぐしたしまり雪，(b) 低温室の壁に成長した霜，(c) あられ (1978年1月21日札幌で採取)。倍率は(a)と(b)は $\times 10.8$ ，(c)は $\times 1.0$

み重ねたふるいの上に、ほぐした雪をのせて機械的に振動すると、各ふるいの中にはおおよそ粒径の揃った雪がたまる。

第2図(a)は機械的にほぐしたしまり雪の顕微鏡写真である。粒子の形は千差万別であるが、おおよそ球と考えてよい。(b)は -15°C に長期間保たれた低温室の壁に成長した霜，(c)は1978年1月21日札幌に降ったあられの写真である。霜の試料は複雑な形の氷粒子の例として、またあられの試料は広い粒径分布を持つ氷粒子の例として実験に使った。

第3図(a)は、このようにして粒径を揃えたしまり雪の顕微鏡写真から求めた粒径ヒストグラムである。粒径は、粒子の投影面積と同じ面積を持つ円の直径で表わされている。また、各ヒストグラムは、100~300個の粒子についての結果である。分布は近似的に正規分布とみなしてよいので、以後試料の代表粒径としては最大頻度の粒径をとり、第3図(a)の場合は、それぞれ $d=0.70\text{ mm}$ 、 1.25 mm および 1.95 mm の雪の試料と呼ぶことにする。ここには示さなかったが、流動化の実験にはこの他に、粒径 $d=0.30\text{ mm}$ および 1.05 mm の雪の試料も使われた。

第3図の(b)と(c)は、霜とあられの粒径分布である。ただし、霜の試料は、第3図(a)の $d=1.95\text{ mm}$ の雪と同じふるいを通したものである。複雑な形のため、正規分布とはなってい



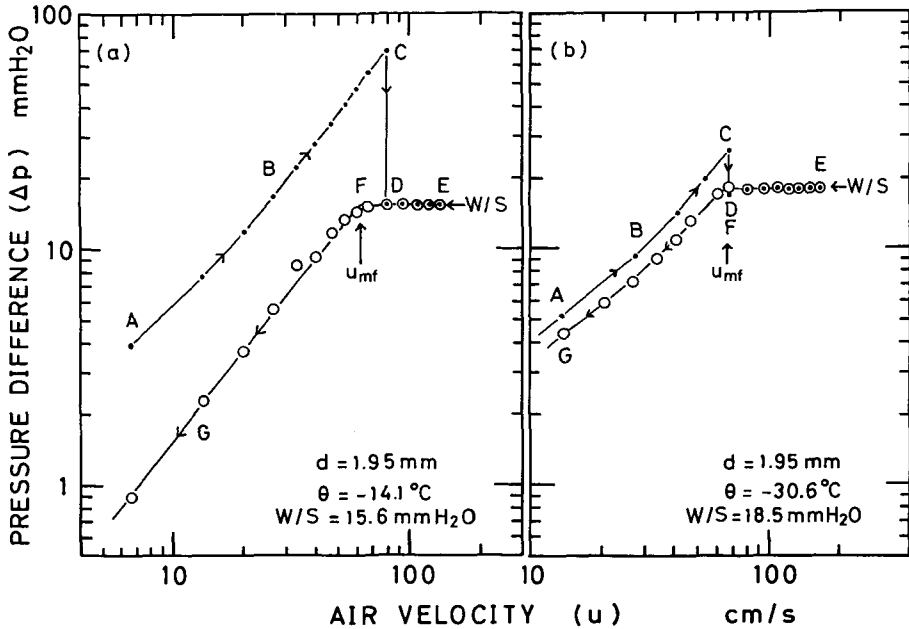
第3図 流動化実験に用いた雪試料の粒径ヒストグラム。(a) しまり雪, (b) 霜, (c) あられ

ない。一方、あられの粒径は1.5~7.5 mm までの広い分布を持っている。最大頻度粒径は $d = 3.55\text{ mm}$ である。

III. 結 果

1. 雪の流動状態とエネルギー損失

雪を管につめ下から空気を吹きこむ時、理論的には、流速がある臨界値に達した時流動状態が出現するはずである。しかし、雪の場合、付着力などの影響のため、流動化の開始はそれほど単純ではない。第4図(a)は、粒径 $d = 1.95\text{ mm}$ の雪 (重量 $W = 19.5\text{ g}$) をつめて空気を流



第4図 圧力差 (Δp) と流速 (u) との関係, 試料は粒径 $d=1.95$ mm のしまり雪で, 温度は (a) $\theta=-14.1^\circ\text{C}$, (b) $\theta=-30.6^\circ\text{C}$. A→B→⋯→F→G は実験順序を示めす

した時の上下の圧力差 (Δp) と流速 (u) との関係である。空気の温度は -14.1°C で, A→B→⋯→F→G は実験の順序を示す。また, Δp は, ブランク・テストによって求めたそれぞれの流速における, 主に支持板による圧力損失を差し引いた値である。

流速が A→B と増加すると, Δp もどんどん増加するが, いつまで待っても, 流動化は始まらない。そこで, 適当な流速において (例えば C 点で) 装置に力学的な衝撃を与えたところ, 雪の粒子は一瞬にしてばらばらに分散し, 流動状態が出現した。この時 Δp は瞬間的に D 点に減少した。更に流速を増しても, Δp の値は変わらずほぼ一定値を保った (E)。この値は, 雪の全重量を管の断面積 (S) で割った値 ($W/S=15.5$ mm H₂O) にほぼ等しい。すなわち, 流動状態の雪による気流の圧力損失は, 平均的には重力に逆らって雪の粒子を空中に浮遊させておくためのエネルギー損失に等しい。

次に, E 点から流速をゆっくり減少してゆくと, F 点付近で流動化が終わり, Δp は減少を始めた (G)。F 点における流速を, 流動状態が持続するのに必要な最小の流速という意味で「最小流動化速度 (minimum fluidization velocity)」と定義し, u_{mf} と書くことにする。 u_{mf} は, 本来は流動状態が出現する時の流速であるが, 上に述べたように, 雪の場合流動化は外部からの衝撃を与えなければ始まらないことが多いため, 本論文では, u_{mf} は流速を減少させる過程で求められた。 u_{mf} の実測値とその温度依存や粒径依存については, あとで述べる。

第4図 (b) は -30.6°C における結果である。粒径は (a) と同様に $d=1.95$ mm であるが, 雪の重量は $W=23.2$ g である。この場合も, 流速を増してゆくと Δp も増加し, ある点で流動状態が出現すると (C), Δp の値は瞬間的に $W/S=18.5$ mm H₂O に向かって減少した (D)。し

かし、この時の流動化は、(a)の時のように人為的な衝撃で始まったのではなく、自然に始まった。

流速を減少させる過程での雪の挙動は(a)の場合と大差ない。しかし、流動化が終るF点が流動化の始まった直後のD点と一致している。つまり、(b)の場合の流動化は、(a)の場合とは違って、流速が u_{mf} に達した時自発的に始まったわけである。このことから、約 -30°C の低温になると、おそらく粒子間の付着力や結合力の効果が小さくなり、流速がある臨界の値を越えると、自然に流動状態が出現することを示している。

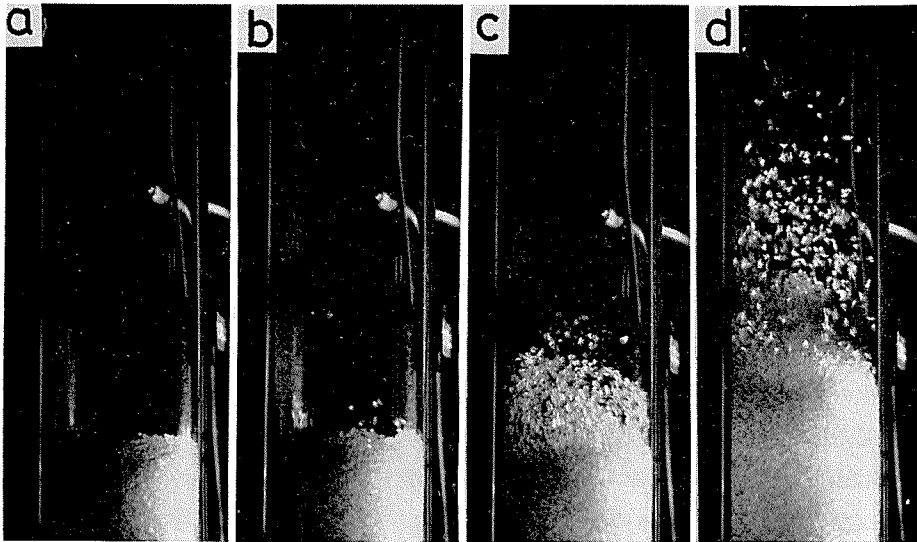
第4図(a)において、C点での圧力損失、 $70\text{ mm H}_2\text{O}$ は、静止状態から流動状態に移るべきなのに移らなかったため雪の中に蓄積された過剰エネルギーとみなすことができる。この状態がエネルギー的に非常に不安定であることは、勝手な点(C)で人為的な衝撃を与えると一瞬にしてより安定な流動状態に移ったことから理解できる。したがって、この現象は、一般の相変化における気相の過飽和(supersaturation)あるいは液相の過冷却(supercooling)と類似の現象と考えることができる。すなわち、静止した雪に空気流から運動エネルギーが与えられる時、安定な流動状態が出現するためには、雪のエネルギー状態がある臨界の状態まで進み、例えば局所的な粒子間結合の破壊などによる「流動化の核(nucleus of fluidization)」が発生しなければならないと考えてよいであろう。流動化の核が、実際の雪のどんな状態あるいは部分に対応するのかは、地吹雪や雪崩の発生とも関連して重要な問題である。

一般の核生成理論²⁾の用語を使うならば、外部からの人工的な衝撃で開始した第4図(a)の流動化は「不均質核生成(heterogeneous nucleation)」と呼ぶべきであろう。また、自発的に始まった(b)の流動化は「均質核生成(homogeneous nucleation)」と呼ぶべきであろう。(a)のC点での圧力損失、 $70\text{ mm H}_2\text{O}$ には、特定の物理的意味はないが、(b)の場合のC点での圧力損失、 $28\text{ mm H}_2\text{O}$ は、雪の中に均質核生成過程で流動化の核を発生させるのに必要な臨界自由エネルギーと考えることができる。

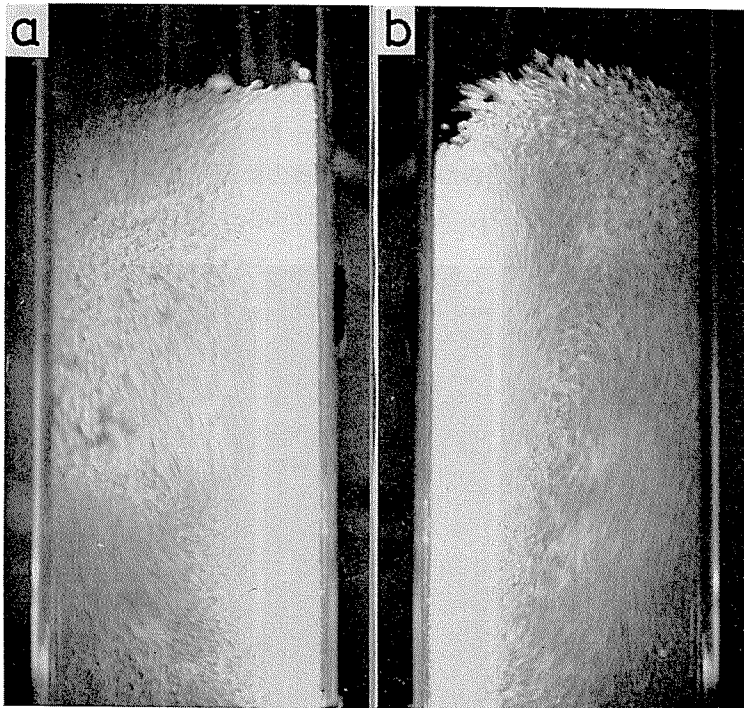
あとで述べるように、雪の流動状態が液体的性質を持つことを考慮するならば、この過剰エネルギーの現象は、過飽和あるいは過冷却の現象と呼ぶよりも、固体(雪の静止状態)から液体(流動状態)へ相変化する時の「過熱(superheating)」の現象と呼ぶ方がより適切であろう。

2. 流動状態の雪の様子

第5図は、粒径 $d=1.25\text{ mm}$ の雪($W=7.8\text{ g}$)を流動化した時の写真である。空気の温度は -13.3°C なので、第4図(a)の時と同じように、流動化は人工的な衝撃で始められ、写真は流速の減少過程、すなわち、(d)、(c)、(b)および(a)の順序で撮られた。流速が零の時の静止状態(a)に比べると、流速が 50 cm/s の時(b)、雪の層が少し膨張し、氷粒子が微小運動を行なっていることがわかる(写真には、幾つかの粒子が空中に飛び上っているのが見える)。流速 80 cm/s では(c)、雪は完全に流動状態となっており、雪の層全体がかなり膨張していると同時に、各粒子が極めて複雑な運動を行なっている。流速 110 cm/s では(d)、流動状態は更に進んで、終端速度の小さな微小粒子は管の外に運び出されてしまう。(b)、(c)、(d)の時の圧力損失の測定値は $\Delta p=5.9\text{ mm H}_2\text{O}$ で、理論値 $W/S=6.2\text{ mm H}_2\text{O}$ よりいくらか小さいが、これは、流動化しているうちに細かな粒子が系外に除かれたためと考えられる。



第5図 流動状態の雪の写真。雪の粒径は $d=1.25$ mm, 温度は $\theta=-13.3^{\circ}\text{C}$ である。流速は (a) $u=0$ cm/s, (b) $u=50$ cm/s, (c) $u=80$ cm/s, (d) $u=110$ cm/s で, 管の内径は 4.0 cm



第6図 流動状態における雪粒子の動き。雪の粒径は $d=1.25$ mm, 温度は $\theta=-14.0^{\circ}\text{C}$, 流速は (a) $u=50$ cm/s, (b) $u=60$ cm/s である。管の内径は 4.0 cm

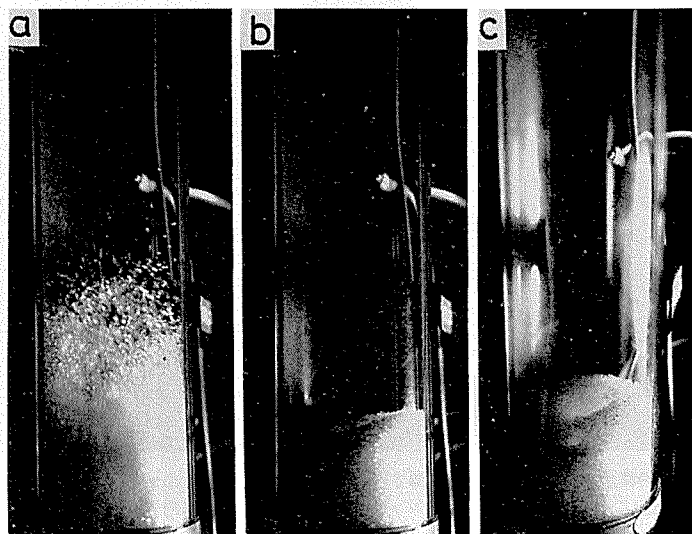
第6図は、流動状態における氷粒子の動きが見えやすいように、シャッター速度を少し遅くして撮った写真である。雪の粒径は $d=1.25\text{ mm}$ で、温度は -14.0°C である。これらの写真を見れば、各粒子の運動はそれぞれ極めて複雑ではあるが、それと同時に、幾つかの粒子群は集団的な流れを形成し、複雑な形の渦領域や粒子の疎密領域を作っていることが理解される。そして、その形や大きさは、空間的にも時間的にも時々刻々変化しているから、雪の流動状態は氷粒子と空気からなる典型的な乱流構造といえることができる。

3. 流動化と雪質

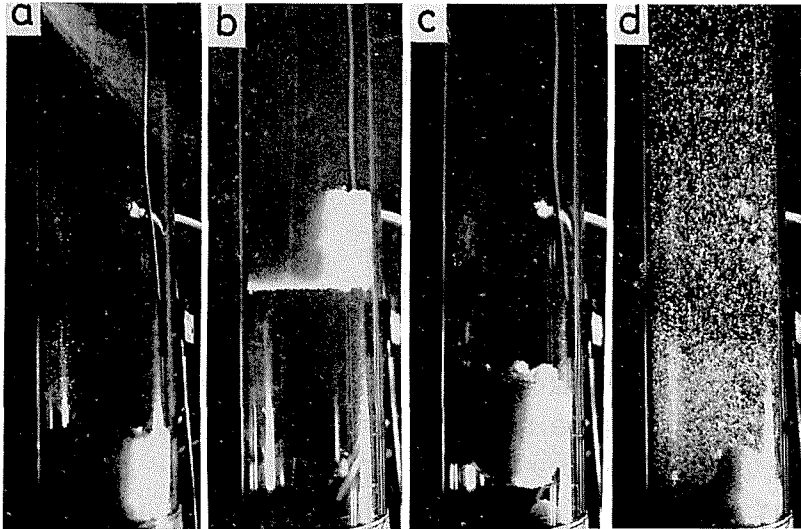
これまででは、比較的良好な流動状態について述べたが、流動状態は、どんな粒径、温度、あるいは雪質の場合でも実現するのではない。

流動化の実験で最も頻繁に起る不安定あるいは不均一な現象は、粒子層の内部に不規則な通路が生じ、流体がそこだけ流れてしまう、いわゆる「チャネリング (channelling, 吹き抜け)」と呼ばれる現象である。第7図にその一例を示す。流速が 60 cm/s の時 (a), いちおう流動状態にはなっているが、全体の様子は極めて不均一で、部分的には氷粒子が凝集している。(b) は、上下の圧力差に急激な減少が観測された時 (40 cm/s) の写真である。この時、大部分の粒子は静止し、一部の少数粒子のみが運動している。こうなるのは、流速を零にしたあと斜め上から撮った写真 (c) から明らかなごとく、雪の中には局部的な通路が生じ、空気がそこのみを通過したからである。われわれの実験では、粒径が小さいほど、かつ温度が高いほど、このようなチャネリング現象が多く観測された。

粒径を揃えたしまり雪の場合、粒径 $d=0.30\text{ mm}$ の雪は、高温ではもちろん -30°C の低温でも、安定な流動化はしなかった。第8図はその一例である。静止の状態 (a) から流速を 25 cm/s とすると、粒子間の結合力が容器との間の摩擦力に勝って、雪全体が持ち上げられた (b)。流速を 70 cm/s まで増したところ、雪は、水平面が傾いたために気流による抗力が減少し



第7図 チャネリングの例。雪の粒径は $d=0.59\text{ mm}$ 、温度は $\theta=-14.4^\circ\text{C}$ 、流速は (a) $u=60\text{ cm/s}$, (b) $u=40\text{ cm/s}$, (c) $u=0\text{ cm/s}$ 。管の内径は 4.0 cm



第8図 流動化しにくい雪の例。粒径 $d=0.30$ mm, 温度 $\theta=-13.0^{\circ}\text{C}$ 。
各写真の説明は本文参照

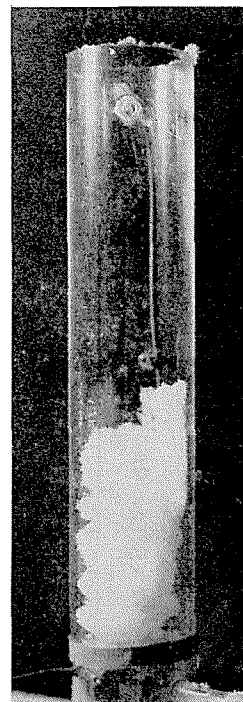
て、管の底部へ落下した(c)。しかし、雪の結合はまだ破壊しない。そこで、細いガラス棒で雪を強制的に攪拌した状態が(d)である。分離した氷粒子のほとんどは、その終端速度が 70 cm/s 以下なので、空気流とともに管の外へ運び出され、結局安定な流動状態は出現しなかった。

同様のことは、新雪の場合にも観測された。第9図は、 -15°C において樹枝状結晶を管につめ、下から空気を送っている写真であるが、流速を増すと雪全体が持ち上ってしまい、流動化は起らない。力学的衝撃や攪拌で雪結晶間の結合を破っても、粒子の幾つかは管外に飛び去り、残りはチャネリングを起しながら凝集してしまう。このように、粒子が極めて小さく、かつ形の複雑な新雪の場合、安定な流動状態を作ることはできなかった。

粒子の形は複雑でも、粒径の大きい霜結晶(第2図(b)と第3図(b)参照)は流動化する。また、粒径分布の広い例として用いたあられ(第2図(c)と第3図(c)参照)も流動化する。この場合、流動化の結果、氷粒子の大きさによるふるいわけが行なわれた。すなわち、流動化したあとのあられ粒子の堆積には、粒子の大きい順に下から上へ積み重なる傾向が見られた。

4. 最小流動化速度 u_{mf}

最小流動化速度 u_{mf} は、安定な流動状態が達成されたあと、流速をゆっくりと減少させながら上下の圧力差 Δp の変

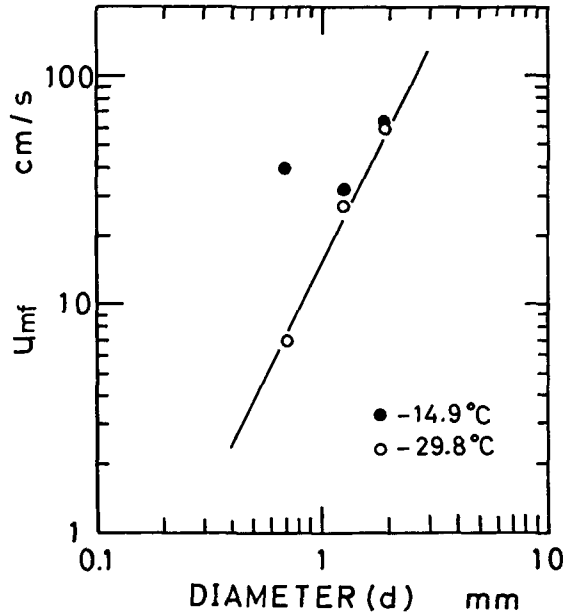


第9図 新雪(樹枝状結晶)の流動化実験。温度 $\theta=-15^{\circ}\text{C}$, 管の内径 4.0 cm

化を観測して求めた。実際には、 $4p$ と u の測定値をグラフに描き、2直線の交わる点の流速を u_{mf} と定義した(第4図参照)。

第10図に、 -14.9°C と -29.8°C で測定された u_{mf} を粒径に対して目盛った。データ数は少ないが、測定値はほぼ一直線上にのっている。つまり、 u_{mf} は温度にはほとんど依存しない。ただし、温度が -14.9°C で粒径が 0.70 mm の時値が異常に大きいのは、粒子間の付着力によるチャネリングの効果が現われたからである。

第10図の直線の勾配はちょうど2であるから、 u_{mf} は粒径(d)の2乗に比例する。つまり、 k を定数とすれば、



第10図 最小流動化速度 (u_{mf}) と粒径 (d) との関係

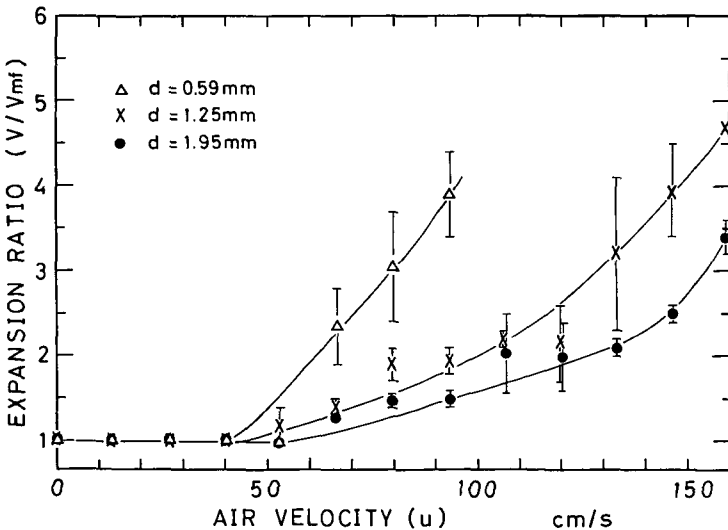
$$u_{mf} = kd^2 \tag{1}$$

と書ける。第10図の場合、 $k=1550\text{ cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ である。

u_{mf} に対しては、温度と粒径の他に、雪の量、すなわち初めにつめる雪の層の高さとの関係も調べた。しかし、両者の間に有意な関係は見い出されなかった。

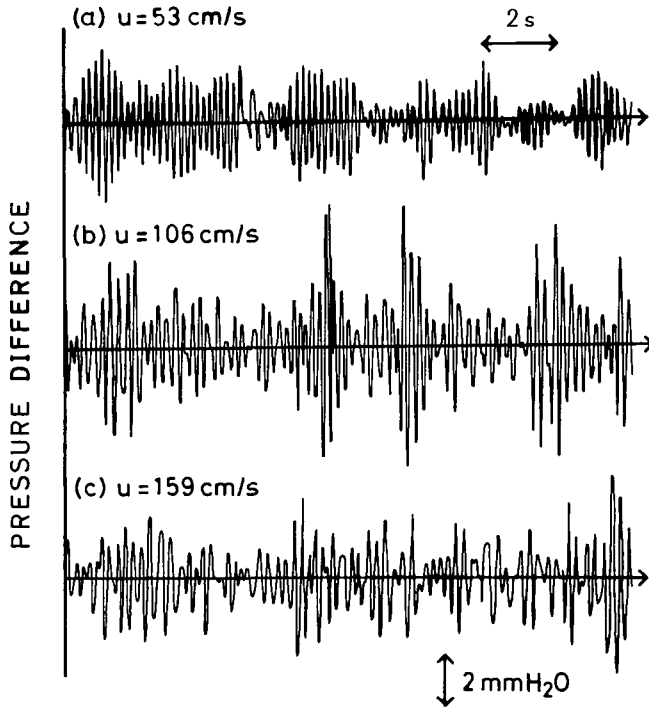
5. 流動状態の雪の層の体積と圧力変動

流動状態の雪の上下の圧力差は、流速を増してもほぼ一定に保たれるが、流動状態の雪の



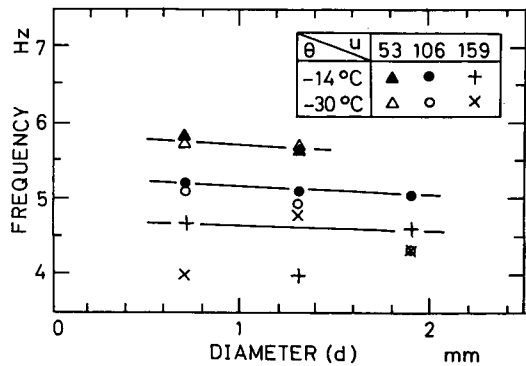
第11図 体積膨張比 (V/V_{mf}) と流速 (u) との関係。温度は -14°C で、 V_{mf} は雪が静止した時の体積である。パラメーターは粒径 (d) である

層の体積は流速とともに増大する。第 11 図には、流動状態の雪の層の体積 (V) と静止状態の時の体積 (V_{mf}) との比、すなわち体積膨張比 (V/V_{mf}) を流速に対して目盛った。パラメーターは粒径である。雪の粒子は激しい運動をしているから、流動状態の雪の層の上面も激しく上下に振動しており、したがって、体積もそれに伴って振動している。図において、体積膨張比の測定値の縦線はそのためにも現われる変動幅を意味する。変動幅は、粒径が小さいほど大きい。この図から明らかなように、流動状態に移ると、すべての粒径の雪の体積は静止の時の体積よりも増え、その割合は流速の増加とともに増す。体積膨張比は、粒径の小さい雪ほど大きい。



第 12 図 圧力差 (Δp) の時間変動。雪の粒径は $d = 1.25$ mm, 温度は $\theta = -29.8^\circ\text{C}$, 雪の重量は $W = 18.0$ g, したがって $W/S = 14.3$ mm H₂O

流動状態の雪の上下の圧力差は流速を増してもほぼ一定であると上に書いたが、それは平均的にみた場合のことで、厳密には、体積の時間変動と同じように、急速な変動が観測される。第 12 図は、粒径 $d = 1.25$ mm の雪 ($W = 18.0$ g) を温度 -29.8°C で流動化した時の、圧力差の時間変動の記録である。平均的な圧力差 ($W/S = 14.3$ mm H₂O) の上に、振幅が $1 \sim 5$ mm H₂O の周期的な変動が重なっている。波形は、幾つかの振動系の組合せによる連成振動を



第 13 図 圧力差の振動の周波数と粒径 (d) との関係。流速 u の単位は cm/s である

暗示しているが、さしあたり速い方の変動のみに注目して、その周波数を読み取り、粒径と流速について目盛ったのが第13図である。周波数は、温度と粒径にはほとんど依存せず、流速の増加とともに減少の傾向を示している。この振動の周波数は、雪の総重量を変えてもそれほど変化しない。また、圧力差の時間変動は、雪を取り除くと消滅する。

流動状態の雪の体積と圧力損失に観測された振動現象については、不明の点が多い。しかし、最近筆者達は、流動状態の雪の空間密度を、3枚の電極間のキャパシタンス変化から求める装置を試作し、予備的測定を行なったところ、空間密度にも振動現象が観測され、しかもそれは圧力損失の振動と同期していることが確かめられた³⁾。

VI. 考 察

1. 流動状態の雪の液体的性質

流動状態の雪の特徴は、氷粒子が文字通り激しい運動をしている点にある。第6図の粒子軌跡の見える写真で注意したように、流動状態の雪は、氷粒子と空気からなる典型的な乱流構造と考えられ、氷粒子の活発かつ複雑な運動は、液体における分子の無秩序運動になぞらえることができるであろう。このことから、流動状態の雪の性質は、液体のそれに類似していることが予想されるが、一般の流動層が液体的性質を示すことは、化学工学の分野では古くから知られていた^{4),5)}。雪の流動状態も、液体との類似性という観点から整理するのが、最も簡便のようである。

(a) 圧力と密度

流動状態の雪の上下の圧力差は平均的には一定で、おおよそ雪の総重量と管の断面積との比に等しい(第4図)。これは雪の層の内部でも成り立つ。したがって、流動状態の雪における任意の上下2点間の圧力差 Δp は、

$$\Delta p = \rho g h \quad (2)$$

と書ける。ここで、 h は2点間の距離、 g は重力加速度、そして ρ は流動状態の雪の層の密度である。 ε を流動状態の雪の空隙率(総体積に占める空間の割合)とすれば、 ρ は、空気と氷の密度をそれぞれ ρ_a および ρ_i として、

$$\rho = \varepsilon \rho_a + (1 - \varepsilon) \rho_i \simeq (1 - \varepsilon) \rho_i \quad (3)$$

と表わされる。第(2)式は、液体における圧力の式とまったく同じ形をしている。

(b) 浮 力

液体中の物体には浮力が働らくが、流動状態の雪の中にも浮力が現われる。このことを示すために、次のような簡単な実験を行なった。

温度 -14.0°C 、流速 58 cm/s のもとで安定な流動状態にある雪(粒径 $d=1.25 \text{ mm}$)に、ピンポン球(みかけ密度 0.08 g/cm^3)を入れたところ、ピンポン球は雪の層の表面付近に浮遊し、底に沈むことはなかった。しかし、雪を取り除き流速 58 cm/s の空気を送った時、ピンポン球は底からまったく浮き上らなかった。

ピンポン球に上向きに作用する力が、流動状態の雪の中で増加したのは、氷粒子の存在の

ために気流が乱れ、乱流による圧力抵抗が増したことで、氷粒子の頻繁な衝突によるピンポン球への運動量輸送とによるものと解釈できる。しかし、雪の全重量を流動状態の雪の層の体積で割って求めた平均密度は $\rho = 0.2 \text{ g/cm}^3$ であったから、この現象は、巨視的には、ピンポン球と流動状態の雪の密度差によって浮力が生じたと表現できる。したがって、流動状態の雪においても、液体と同じような浮力の原理が成り立っているとみて差し障らない。雪崩に巻きこまれた時人が泳げるためには、この浮力の存在が重要である。

(c) 体積膨張

流動状態の雪の層の体積が流速の増加とともに膨張する現象 (第 11 図) は、温度上昇による液体の体積膨張と対比させることができる。臨界点以下の温度 (T) において、通常の液体の体積 (V_l) は、融解温度を T_m 、その時の体積を V_{lm} とすれば、一般に

$$\frac{V_l}{V_{lm}} = 1 + a(T - T_m) + b(T - T_m)^2 + \dots \quad (4)$$

と書き表わされる⁶⁾。 a, b, \dots は液体の種類で決まる定数であるが、通常 b 以降は a に比べて小さい。したがって、液体の体積は、融解温度近くでは温度の 1 次式で表わされ、温度が高くなるに従って 2 次以降の項が優勢になる。

一方、第 11 図の結果から、流動状態の雪の層の体積 (V) も、最小流動化速度を u_{mf} 、その時の体積を V_{mf} と置けば、 u_{mf} より大きい流速 (u) に対して、

$$\frac{V}{V_{mf}} = 1 + a'(u - u_{mf}) + b'(u - u_{mf})^2 + \dots \quad (5)$$

と書き表わすことができる。測定結果から明らかなように、流速があまり大きくない領域では、2 次以降の項は 1 次の項に比べて無視できであろう。しかし、流速の増加とともに 2 次以降の項が重要となり、体積膨張比は流速の 1 次関数ではなくなる。

第 (4) 式と第 (5) 式の形の類似性から、流動状態の雪における流速 u は、液体における温度 T に対応することが予想される。液体中の分子運動の目安は絶対温度で与えられるのであるから、流動状態の雪における氷粒子の運動の激しさは流速で与えられると考えてよさそうである。

このことから、雪が静止状態から流動状態に移る時の最小流動化速度 u_{mf} は、固体が液体に移る時の融解温度 T_m に対応すると考えることができ、また、流速が氷粒子の終端速度 u_t に達すると、すべての粒子が飛散してしまうことから、 u_t は液体が気体になる時の沸点温度 T_b に対応すると考えることができる。

(d) 流動状態の雪の物理的性質

流動状態の雪の層の密度が時間的にも空間的にも変動していることは、前に触れた。その極端な例は、例えば、第 6 図 (a) の写真の左中間部に黒く写っている数点の「気泡」である。この部分が黒く写っているのは、そこにはほとんど氷粒子が存在しないからである。このような気泡が管の底部で発生し、上へ浮上してゆくのがしばしば観察された。

気泡の存在は、流動状態の雪に明確な境界面 (表面) が存在することを示唆する。事実、流動状態の雪の上面は、平均的には常に平らで、その法線方向は液体と同じように、重力方向と

一致する。この表面に、液体と同じような表面張力が働いているかどうかは明らかでない。しかし、気泡の存在や、表面が最小面積の平面になる傾向は、表面張力の存在によると考えられないこともない。また、最近の小林⁷⁾の観測によれば、地吹雪の時、主に堆積域の雪面に発生するさざ波(ripple)模様は、積雪表面が流動状態になったための一種の表面張力波と解釈することもできそうである。

しかし、液体には分子間力が存在するが、流動状態の氷粒子間にはそのような力は存在しないから、液体の表面張力の概念は、そのままの形では流動状態の雪に適用できないであろう。しかしながら、最近行なわれた荒岡・前野の氷の反発係数の測定⁸⁾からも予測できるように、流動状態における氷粒子間の衝突は常に非弾性的であるから、これを、液体の分子間力に似た、粒子間の相互作用とみなすことは可能であろう。この粒子間相互作用としての表面張力の概念は、雪や砂の表面に生じる種々の波模様の発生機構の解釈に重要な鍵を与えるかもしれない。

流動状態の雪の最も特徴的な性質は、種々の物理量の輸送が、極めて速やかに行なわれる点である。流動状態の雪においては、空気の乱流とともに、氷粒子自身の運動があるから、熱輸送も、物質輸送も、静止状態に比べれば格段に増加する。筆者達は、エネルギー輸送としての熱伝達係数と、運動量輸送としての粘性係数を測定し、別に報告した⁹⁾。

2. 流動化の始まり

力学的釣合だけを考えるならば、流動状態は、粒子の総重量と流体の圧力損失とが等しくなった時出現するはずである。したがって、最小流動化速度 u_{mf} は、層高 L の雪による圧力損失 $4p$ が、

$$\frac{4p}{L} = (1-\varepsilon)(\rho_i - \rho_a)g \quad (6)$$

の条件を満足する時の流速である。

多孔性物質を流体が流れる時の圧力損失については多くの理論式や経験式が発表されているが、Ergun¹⁰⁾はそれらを種々の観点から吟味し、層流域と乱流域の両方で使える一般式にまとめた。それは、粒径 d の均一な粉体層の場合

$$\frac{4p}{L} = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\eta_a u}{d^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_a u^2}{d} \quad (7)$$

と書き表わされる。 η_a と ρ_a は、空気の粘性係数と密度である。第(7)式で、第一項は粘性による摩擦抵抗を、第二項は乱流による圧力抵抗を意味する。Reynolds 数 ($Re = d u \rho_a / \eta_a$) が小さい時第二項は第一項に比べて無視でき、第(7)式は Kozeny-Carman の式と呼ばれる。また、Reynolds 数が大きくなると(おおよそ $Re > 1000$ の時)、第一項が第二項に比べて無視でき、第(7)式は Burke-Plummer の式と呼ばれる。

氷粒子の粒径を 1 mm, 空気の流速を 50 cm/s とすると、Reynolds 数は約 40 となるから、われわれの雪の流動化実験の場合、第(7)式の第二項を省略した Kozeny-Carman の式を使うことにする。これを、力学的な流動化開始の条件式(6)に入れると、雪の最小流動化速度は

$$u_{mf} = \frac{(\rho_i - \rho_a)g}{150 \eta_a} \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} d^2 \quad (8)$$

となる。

u_{mf} が d^2 に比例して増加するという関係は、測定結果とよくあう (第 10 図と第 (1) 式)。したがって、第 (1) 式に現われた実験定数 k の物理的意味も、第 (8) 式から明らかとなる。

III の 1 節で述べたように、雪が静止状態から流動状態へ移る過程は、過飽和や過冷却の現象と似ており、前節の流動状態と液体との類似性を強調するならば、固体 (静止状態) が融解温度 (最小流動化速度) 以上に過熱され、内部に融解の核 (流動化の核) が発生する現象とみなすことができる。したがって、流速を増しながら測定を行なう時は、温度が相当低いか、あるいは粒子の形が単純で粒径が大きくない限り、不規則な核生成が起ってしまう。そして、そのため流動化の開始の流速は一定せず、しかもその物理的意味は薄れる。すなわち、雪の内部にたまたま一箇所でも他に比べて力学的に弱い場所があれば、そこから流動化が始まる可能性がある。また、偶然与えられた外部からの力学的衝撃も流動化開始のきっかけとなる可能性がある。

松丸¹¹⁾ は -7°C の粉雪で $u_{mf}=258\text{ cm/s}$ という、われわれの値に比べて極めて大きな値を発表しているが、これは、上述したような不安定な過熱の状態が、なにかの外的衝撃で破れた時の流速を測定したためと想像される。

吉田¹²⁾ は、気圧の急減によって積雪内に気流が発生し、雪の粒子が空中に飛び出す現象を理論的に取扱った。彼は、雪粒子には付着力がなく、かつその終端速度は一律に 50 cm/s であると仮定して、新雪が空中に飛散するために必要な鉛直方向の圧力勾配が $0.13\text{ mb/cm}=1.33\text{ mm H}_2\text{O/cm}$ であることを示めた。しかし、われわれの雪の流動化実験の結果から予測されるように、気圧降下による雪の飛散も、積雪表面層に流動化の核が発生して初めて起ると考えられる。したがって、実際の雪の飛散現象を想定する限り、氷粒子間の付着力や結合は無視することはできないであろう。先にも述べたように、流動状態が均質核生成する時の臨界自由エネルギー (第 4 図 (b) の C 点での圧力損失 $\Delta p=28\text{ mm H}_2\text{O}$)こそ、その雪の幾何学的・力学的構造で決まる臨界過剰エネルギーであり、このエネルギーを雪に与える時の流速が、本来の最小流動化速度である。

V. あとがき

実際の雪を用いて流動状態をつくりだす実験を行ない、流動状態の雪が多くの点で液体と似ていることを明らかにした。流動状態の雪の典型的な例は雪崩と地吹雪であるが、この他にも、例えば自動車のタイヤがスリップしている時の雪とか、除雪車が排除しつつある雪なども流動状態にある。これらの雪の流動状態と今回実験室で作りだした流動状態とは、完全に同じではない。例えば、雪崩の場合は、雪全体が集団的に一方向に移動しつつあるし、地吹雪の場合は、空気流の方向は下から上ではなく水平方向である。しかし、それらは、ここで得られた結果に大きな修正を必要とするほどの本質的な違いではないと考えられる。

この論文の図を作製する際お世話になった大学院生の荒阿邦明君と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) Kunii, D. and Levenspiel, O. 1969 Fluidization Engineering. John Wiley and Sons, New York, 534 pp.
- 2) フレッチャー, N. H. 1974 氷の化学物理 (前野紀一訳), 共立出版, 東京, 235 pp.
- 3) 前野紀一・西村浩一 1978 流動状態の雪の性質 (II). 昭和 53 年度日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, 22.
- 4) 古川淳二・大前 磊 1951 流動粉体の性質 (第 1 報). 工業化学雑誌, **54**, 798-800.
- 5) Gelperin, N. I. and Einstein, V. G. 1971 The analogy between fluidized beds and liquids. In Fluidization (ed. by J. F. Davidson and D. Harrison). Academic Press, London, 541-568.
- 6) Moelwyn-Hughes, E. A. 1961 Physical Chemistry. 2nd revised edition, Pergamon Press, Oxford, 1334 pp.
- 7) 小林俊一 (私信).
- 8) 荒岡邦明・前野紀一 1978 氷の反発係数の測定. 低温科学, 物理篇, **36**, 55-65.
- 9) 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.
- 10) Ergun, S. 1952 Fluid flow through packed columns. *Chem. Engr. Progress*, **48**, 89-94.
- 11) 松丸秀夫 1973 流動法による雪の結晶間の付着力の測定. 昭和 48 年度日本雪氷学会秋季大会講演予稿集. 26; 黒岩大助 1976 分散系としての雪の構造と力学. 気象研究ノート, **128**, 230-251.
- 12) 吉田順五 1976 気圧の局所急速降下による積雪の飛散 I. 低温科学, 物理篇, **34**, 1-15.

Summary

Fluidized snow was produced in a transparent tube of 4.0 cm in diameter, by introducing an upward air flow of constant temperature and velocity (Fig. 1), and its various behaviours were investigated as functions of temperature, velocity of air flow, diameter of snow particle, and so on.

The minimum velocity of air flow sufficient to cause fluidization, u_{mf} , was determined from the plots of pressure differences across the fluidized snow against velocity of air flow (Fig. 4). The minimum fluidization velocity was almost independent of temperature, but increased with increasing diameters of snow particles (Fig. 10).

Complex movements of snow particles in a fluidized state are similar to those of molecules in liquids, and the overall behaviour of the fluidized snow was found to be liquid-like. Namely, the pressure difference across the fluidized snow was equal to the weight of the snow divided by the cross-sectional area of the tube; the volume of the fluidized snow increased with increasing velocity (Fig. 11) just as liquids expand with rising temperature; and the buoyancy increased by the fluidization of snow.

Frequencies of oscillation of pressure difference across the fluidized snow were found to increase with decreasing velocity, but not to depend upon diameters of snow particles and their total weight.