



Title	雪氷混相流の研究 IV : 停止と堆積
Author(s)	成瀬, 廉二; NARUSE, Renji; 西村, 浩一 他
Citation	低温科学. 物理篇, 44, 165-176
Issue Date	1986-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18527
Type	departmental bulletin paper
File Information	44_p165-176.pdf



雪氷混相流の研究 IV*

— 停止と堆積 —

成瀬 廉二・西村 浩一・前野 紀一

(低温科学研究所)

(昭和60年10月受理)

I. はじめに

雪崩の停止過程や滑走距離を予測することは、雪崩災害防止対策を講ずる上で非常に重要である。雪崩の最大速度(終端速度)およびデブリ先端位置(滑走距離)等を与える理論的とりあつかいは、近年 Voellmy¹⁾, Perla 他²⁾等によって行われた。これらの理論にもとづき、地形要素やデブリ位置の測定結果を用い、雪崩運動の抵抗に関する諸係数の決定や数値実験などが試みられている(たとえば、文献^{3,4)})。しかし、実際の雪崩の運動中の観測値が不足しているため、これらの研究も十分に目的を達しているとは言えない。

一方、デブリは、一般に密度が大きく、硬いことが多い。このことは、雪崩埋没者の窒息死を早めるとともに、捜索救助活動を困難にしている。アメリカ合衆国の統計⁵⁾によると、雪崩遭難者の生存率は、埋没後30分で50%以下、3時間で約10%となっている。したがって、雪崩による死亡事故を減少させるためには、デブリの形成過程およびデブリの雪氷物理学的諸特性を明らかにする必要がある。

筆者等は、雪崩を空気と雪粒子からなる二相の気相雪氷混相流としてとらえ研究をすすめている^{6~8)}。本論文は、この一連の研究の内、雪氷混相流の停止と堆積過程および堆積物(デブリ)の性質について述べる。

II. 実験と測定方法

1. 実験の装置と方法

雪氷混相流の実験装置の概要は、別報⁷⁾に述べた。傾斜角27度の樋の下端に、長さ3.64 m、幅1.82 mの平滑な板(以下、堆積板とよぶ)を水平に接続させた。堆積板の材質は、建築物の壁等に使用される断熱材の一種(ダイケン・シージングボード IC)である。表面には小さな凹凸があるので、その上に塗料を塗布して比較的滑らかに仕上げた。

堆積板の上に載せた雪が自然に滑り始める傾斜角 θ の測定から、堆積板の静止摩擦係数($\mu_s = \tan \theta$)を求めたところ、雪粒子または小さな雪塊に対して、 $\mu_s = 0.18 \sim 0.42$ であった(-13°C)。雪粒子は μ_s が大きく、小雪塊は μ_s が小さい傾向を示した。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2786号

本報告で解析に用いる実験の概要を第1表にまとめた。流動時間とは、雪粒子供給装置の運転時間である。質量速度 (kg/s) は、一実験に供給した全雪質量を流動時間で除した値である。混相流の先端速度の測定方法については別報⁷⁾を参照されたい。

第1表 堆積の解析に用いた雪氷混相流実験の概要。
詳しくは、別報⁷⁾を参照されたい

実験番号	流動時間 (sec)	質量速度 (kg/s)	先端速度		雪質
			光透過法 (m/s)	ビデオ法 (m/s)	
#23~#24	30.5	2.92	6.0	—	2年しまり雪
#30	26	0.96	6.0	6.0	1年しまり雪
#37	25	0.97	5.1	5.7	同上
#40	26.5	1.45	4.5	5.0	2年しまり雪
#47	22	1.16	4.5	5.9	2年しまり雪の小雪塊 (直径7 cm 以下)
#48	23.2	2.34	4.5	—	2年しまり雪
#67	14.6	2.31	4.6	—	1年しまり雪
#74	20.3	2.28	—	6.1	同上
#79	17.5	1.98	4.2	6.1	同上

雪質の内、1年雪とあるのは雪試料採取後1年以内の雪を示す。しかし実際には、採取後1~5カ月の雪で、雪結晶の外形をまだ残しているしまり雪である。2年雪とあるのは、採取後、低温室内にて1年以上保存された雪で、1年雪に比べて平均粒径は大きい⁷⁾。

2. 測定の方法

1) モーター・ドライブ・カメラによる撮影

堆積板の下流端にモーター・ドライブ・カメラを設置し、堆積板上の運動の様子、および堆積過程の撮影を行った。

焦点距離 35 mm レンズ付 35 mm カメラを使用し、伏角 30 度にて斜め写真を撮影した。フィルムは ASA 100 の白黒長尺フィルムまたはカラーリバーサルを用いた。

堆積板上には 0.5 m 毎の格子線が描かれ、かつ一辺には物差しが付けられている。これらの目盛を基準とし、斜め写真から平面図に変換した。

堆積板の一角に大型の時計を置き、写真上に写しこんだ。この時計の秒針から、1コマ毎の時刻を 0.1 秒の単位で読みとった。照明の条件によってやや異なるが、シャッタースピードは 1/15~1/60 秒、および一実験 30 秒の場合は写真の枚数は 93 コマであった。すなわち、1コマの時間間隔は 0.32 秒である。

2) デブリの形態と内部構造の測定

形成されたデブリについて、0.1 m 間隔の格子点にて、物差しによる測深により深さ分布を測定した。またデブリ中央の縦断線に沿う鉛直断面内において、表面の細かい起伏のスケッチ、および内部構造の観察を行った。

黒、緑、黄、赤に着色したオガクズを、約 0.1 ℓ ずつ 3~5 秒間隔で実験中に樋上端から混入させた。この着色層は流動中に雪粒子にまざり、デブリ内に明瞭な層を残した。これにより、

堆積過程中に形成される層構造を判読できる。

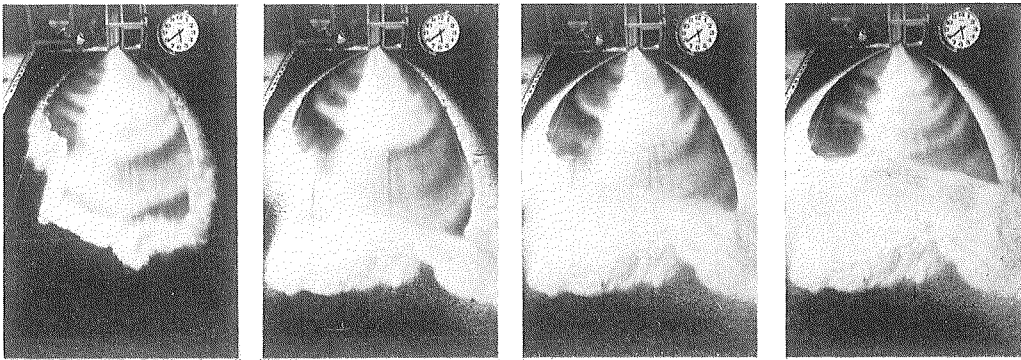
3) デブリの密度測定

容積 0.101 ℓ の角型サンプラーにより採取した雪試料の質量を秤量し、密度を求めた。

III. 実験結果と考察

1. 堆積板上の速度分布

堆積板上における雪氷混相流の停止過程の写真を第1図に示す。図の4枚の写真は、実験 #48 の実験初期 (開始後 3.6 秒) から中期 (9.6 秒後) にかけて 2 秒毎に撮影されたものである。



第1図 雪氷混相流の停止、堆積過程 (モータードライブ写真)
写真左から右へ 2 秒間隔。(実験 #48)

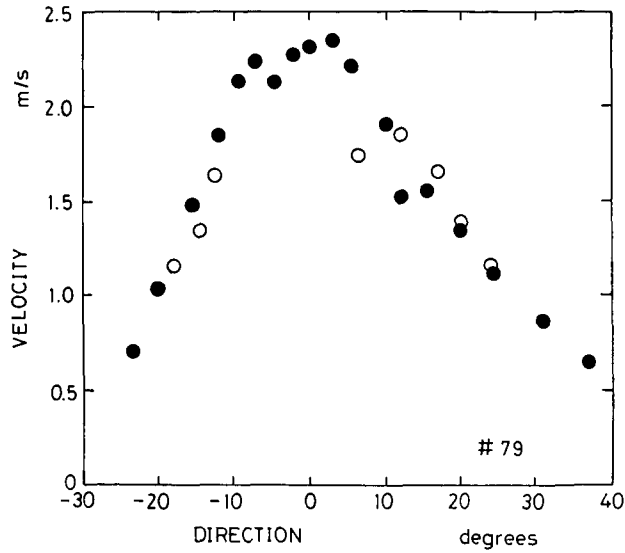
写真から明らかなように、樋出口から流れ出た混相流は左右へ約 30 度の角度にて扇状に広がる。下流域では、混相流が停止し、デブリを形成しつつある。

滑走中の混相流の内、白く見える部分は混相流の濃度が高い、または層が厚い所で、灰色または黒く見える部分は濃度が低い、または層が薄い所である。いずれの実験においても、中央線付近の質量流束は密で、左、右の周辺部は疎であることが写真上に認められた。

滑走中の濃淡縞模様の内、顕著な形の部分に着目して、写真の 2 コマ間の変位ベクトルを測定した。シャッタースピード 1/30 秒の場合、雪粒子または小雪塊の運動のため、写真上に長さ 3~8 cm の線分が認められる。この線分の方が速度の方向と判定できる。速度の方向は、おおむね樋出口中央から下流側に放射状に向いている。

いま、樋出口の中央に座標原点をおき、樋に平行に下流側に x 軸、その直角方向に y 軸をとる。1 枚の写真上の 1 つの目印の座標 (x_1, y_1) と、次のコマの同一目印の座標 (x_2, y_2) から速度 $u = \{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2\}^{0.5} / t$ を求め、原点から座標 (x_1, y_1) へ向かう方位に対して第 2 図にプロットした。ただし、方位 0 度は x 方向を、正の方位は x 方向に対して時計まわり、負の方位は反時計まわりを表わす。

第 2 図の測定値は実験 #79 の例で、黒丸および白丸はそれぞれが同一の縞模様に対する値である。結果は、中央部分の速度は大きく、両側に向かうにしたがって急激に小さくなっていく。速度分布の全体の傾向は、やや変形した放物線に近い。負の方位の速度に比べ、正の方位

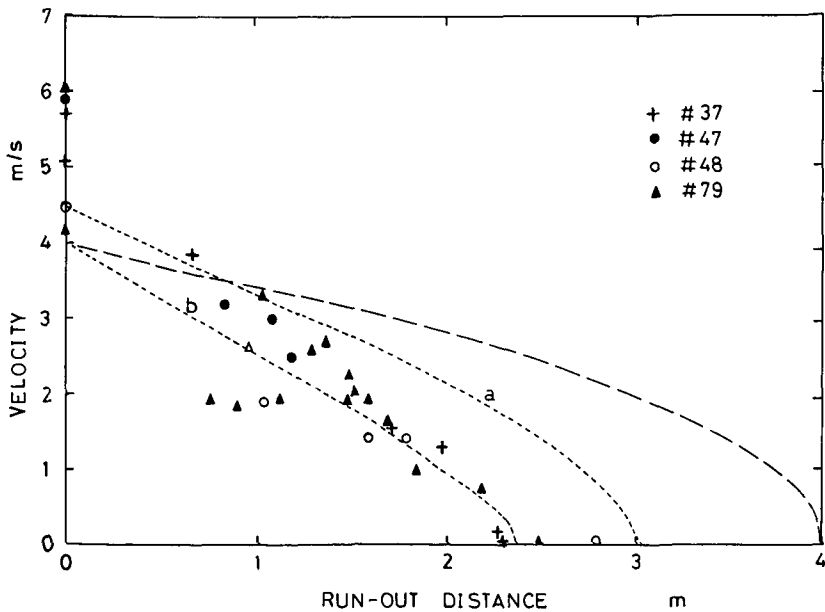


第2図 堆積板上の速度分布 (実験 #79)
横軸は樋出口中央からの方位 (時計まわりに正)

の速度がやや大きいのは、樋の構造が原因で、混相流が完全には左右対称になっていないことを示していると考えられる。

2. 減速過程

滑走中の混相流の縞模様や小雪塊を目印として、前述と同様な方法により、いろいろな場所における流動速度を測定した。中央線 ($y=0$) に近い部分の速度 (u) を、滑走距離 x に対して第3図に示した。(ただし、 $x=0$ のときの速度は樋内の先端速度 u_t)。



第3図 堆積板上の速度分布 (中央線上)。横軸は滑走距離

樋内の流れ層にて光透過率法や高速ビデオシステムで測定された先端速度 u_f (第1表参照) が樋出口の速度と仮定すると、樋出口 ($x=0$) における水平初速度 u_0 は

$$u_0 = u_f \cos \theta \quad (1)$$

で得られる。ただし、 θ は樋の傾斜角である。第3図に示した実験例では、 u_0 は 4 m/s から 5 m/s の範囲にあり、測定値は、全体の傾向としては x につれ序々に減速し、 $x=2\sim 3$ m 地点にて零となっている。

速度の測定誤差は ± 0.5 m/s 以下と見積もられる。第3図において、 ± 0.5 m/s 程度の誤差を考慮に入れても、なお実験毎に速度が異なるのは、雪質および雪供給量、滑走面上のよごれ等の性質の相違に起因していると考えられる。

堆積板表面の雪に対する動摩擦係数 μ を 0.2 と仮定し、堆積板上の運動の抵抗を底面のクーロン摩擦のみによるとした場合の、仮想的速度分布曲線を第3図に破線で示した。ただし、 $u_0=4$ m/s と置いた。同曲線は、全般に測定値より大きく、 $x=4$ m にて速度は零となる。なお、 $\mu=0.35$ 程度と大きな値を与えれば、クーロン摩擦のみの理論曲線は測定値に近づくが、II. 1. で述べたように静止摩擦係数の測定値が 0.2~0.4 の範囲にあるので、動摩擦係数が 0.2 より著しく大きいことは考えにくい。したがって、ここでは $\mu=0.2$ とおいた。

Voellmy¹⁾, Perla 他²⁾ や前野⁹⁾ 等は、雪崩の運動の抵抗力として、クーロン摩擦力のみではなく、速度 u の二乗に比例する抵抗力が働らくと考えた。このとき、水平面上の質量 m の速度は、

$$u = \left[\left(u_0^2 + \frac{\mu g m}{\beta} \right) e^{-\frac{2\beta}{m} x} - \frac{\mu g m}{\beta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

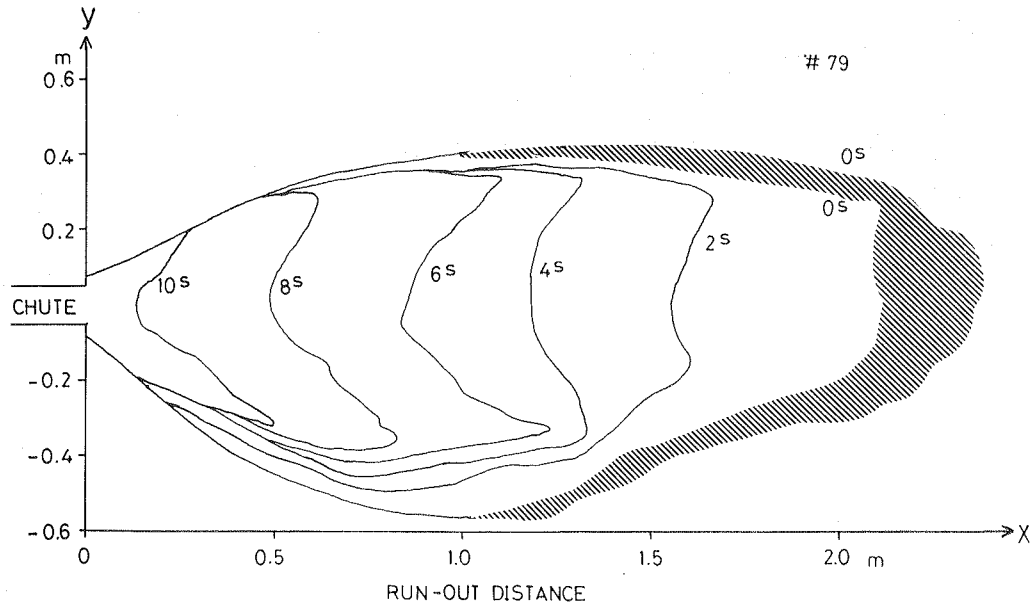
で与えられる。ここで、 u_0 は $x=0$ における初速度、 β は空気抵抗、乱流、除雪、圧密等に起因する抵抗の係数、 g は重力加速度である。 $\mu=0.2$ と仮定し、a) [$u_0=4.5$ m/s, $m/\beta=6$] および b) [$u_0=4.0$ m/s, $m/\beta=4$] とおいたときの計算結果を第3図に点線にて示した。測定値は、破線や a) の曲線よりも、b) の曲線に近い。

本解析では、速度測定値の誤差が小さくなく、かつ様々な条件が異なる実験を一括して検討しているので、雪崩の運動の抵抗に関する詳しい議論はできない。しかし、実験結果からは、雪崩の減速、停止過程にはクーロン摩擦よりも強い速度依存を示す抵抗力が重要な寄与をしていると結論できる。

3. 停止機構

前節では、平滑かつ水平な堆積板上を滑走しつつ、減速、停止する過程を示した。雪氷混相流の先端部分の雪が、ある距離すすんで速度零となって停止すると、後続の雪の運動は停止雪(デブリ)により抵抗を受ける。多くの実験の観察によると、先端部分の停止後、後続の雪の衝突によって停止雪の再移動、あるいはのり上げが認められることもある。しかし多くの場合は、先端部分が停止後は、そのデブリが障害物となり、つぎつぎに衝突、停止し、デブリは上流側に成長してゆく。

以上のようなデブリ成長過程の一例を第4図に示す。0 s と付した斜線域は、実験開始約4秒後の停止デブリの輪郭を示している。2, 4, 6, 8, 10 s の線は、その後の2秒毎のデブリの



第4図 デブリの停止位置の時間変化 (実験 #79)

0sと印した斜線部分は、実験開始約4秒後の停止デブリを示す。
2, ..., 10sはその後のデブリの上流端の位置を示す

上流周縁、すなわち滑走してきた雪が衝突、停止した位置を示す。各等時線と、0sの外側の線との間の部分が停止デブリの領域である。

第4図にて認められる特徴は次のような傾向である。

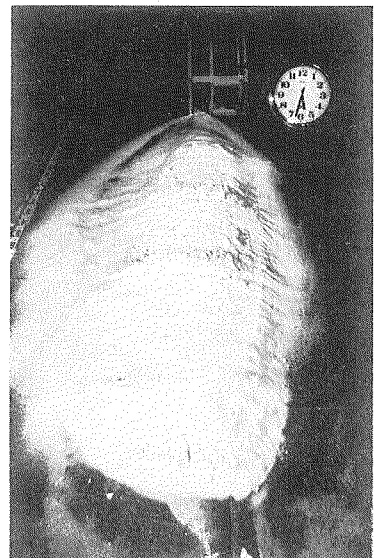
① 実験初期では、下流側に凸のバルハン状のデブリが形成される。これは、中央線付近 ($y \approx 0$) の速度が両側に比べて大きいこと (第2図) に起因している。

② その後は、中央線付近のデブリ周縁の成長速度が両側に比べて速く、最終的には扁平な楕円形となる。このことは、中央線付近を滑走する混相流の質量流束が両側に比べて大きいことの結果と考えられる。

第4図 (実験 #79) の中央線上のデブリ成長速度は、平均 0.2 m/s となっている。この速度の大小が、デブリ表面模様の規模 (波長) と深い関係がある (III. 5. 参照)。

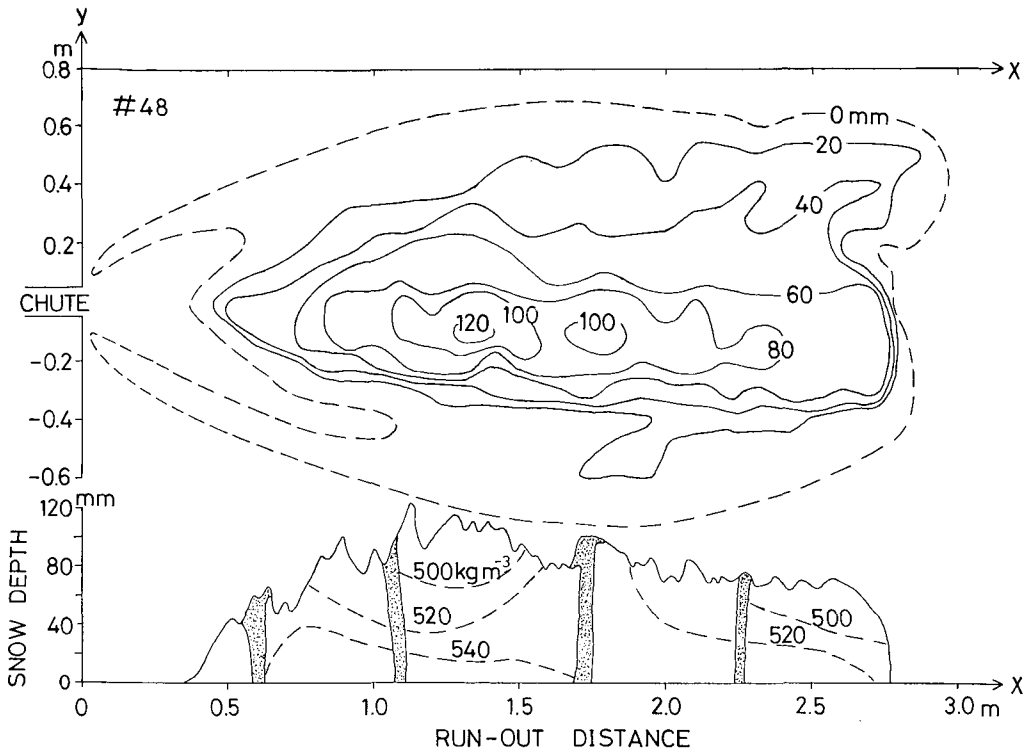
4. デブリの形態

実験終了後の最終デブリ形態の写真を第5図に示す。デブリ上流縁が樋の出口に達する前に実験を終了した場合、あるいは樋内にまでデブリが成長した場合、等によってデブリの形態はやや異なる。

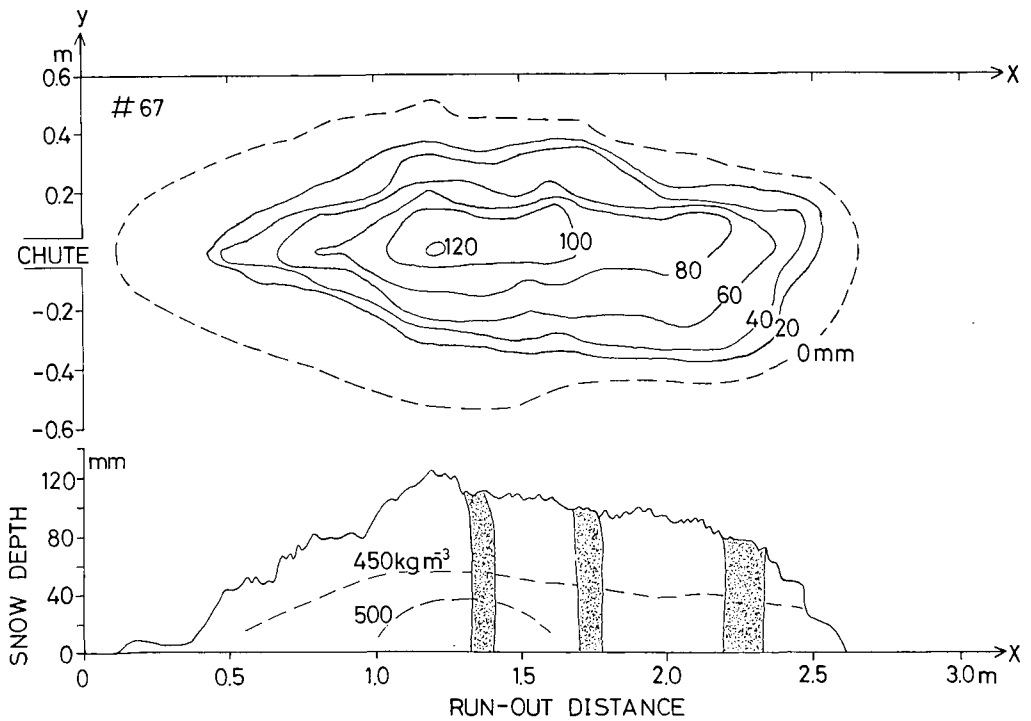


第5図 デブリの写真 (実験 #74)

第6図、第7図にデブリ最終形態の平面図と中央線



第6図 デブリの平面図と断面図(実験#48)



第7図 デブリの平面図と断面図(実験#67)

($y=0$) に沿う鉛直断面図を示す。両図 (実験 #48, 実験 #67) とも、デブリ上流端が樋に達していない実験例である。

デブリの総質量は、前者が 54.2 kg, 後者が 33.7 kg と大きく異なるが、デブリの全体の形態は両者ともよく似ている。最大深は両者で等しいが、20 mm 等高線以上の部分は前者の面積の方が大きい。

デブリ断面図に、着色オガクズの混入した雪の層を示した。これらの層位はいずれもほぼ鉛直に分布しており、デブリ成長時の上流縁は急傾斜の壁状で、つぎつぎに上流側へ雪が堆積して行った過程がよみとれる。

5. 表面模様

すべての実験において、デブリ表面には x 軸に直角方向に伸びる山、谷の凹凸模様が形成された。

第 6, 7 図の縦断面図に認められる表面起伏の内、山一山の長さ (波長) の頻度分布を第 8 図に示した。ただし、波長 30 mm 未満の微細な模様は測定されていない。

卓越波長は、実験 #48 は 60~70 mm, 実験 #67 は 30~40 mm と顕著に異なる。

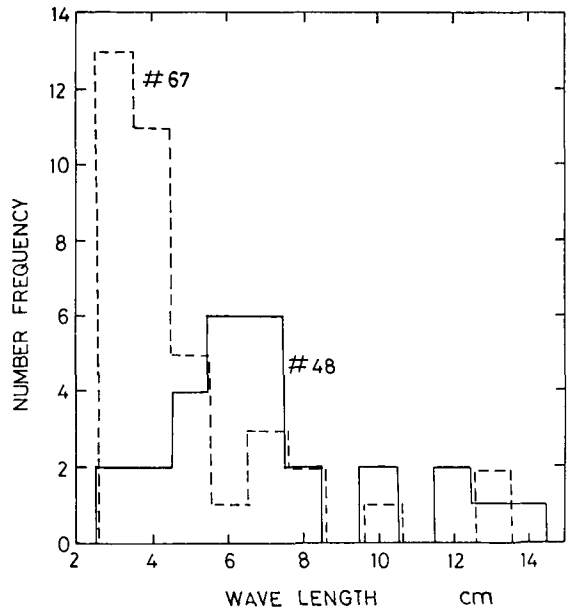
デブリ形成速度、すなわちデブリ上流縁の移動速度は、第 4 図と同様な写真解析の結果、実験 #48 は平均約 110 mm/s, 実験 #67 は約 190 mm/s であった。したがって、前者の波長 60~70 mm の山は約 0.6 秒毎に、後者の波長 30~40 mm の山は約 0.2 秒毎に形成されたことになる。

このようなデブリ表面の山、谷の起伏は、デブリ上流縁近傍にて雪の堆積過程に形成されていることは、写真解析から明らかである。したがって、堆積板を滑走中、および樋内を流動中の混相流に、濃度、層厚、流速などに周期的な振動現象が存在し、この影響が堆積模様に反映されたことが予想される。

なお実験 #48 は 2 年雪, 実験 #67 は 1 年雪である。この雪質の相違が、表面模様の波長にどう影響を与えているのかなど詳しい機構については、デブリの解析のみでは明らかとはならない。また、短波長 (30 mm 未満) の模様まで含めた微細構造の解析を行うためには、より精密な形態測定を行う必要がある。

6. 密度分布

第 6 図, 第 7 図の縦断面図内に、雪密度の等値線を示した。密度測定点数は、第 6 図 18 点, 第 7 図 10 点である。



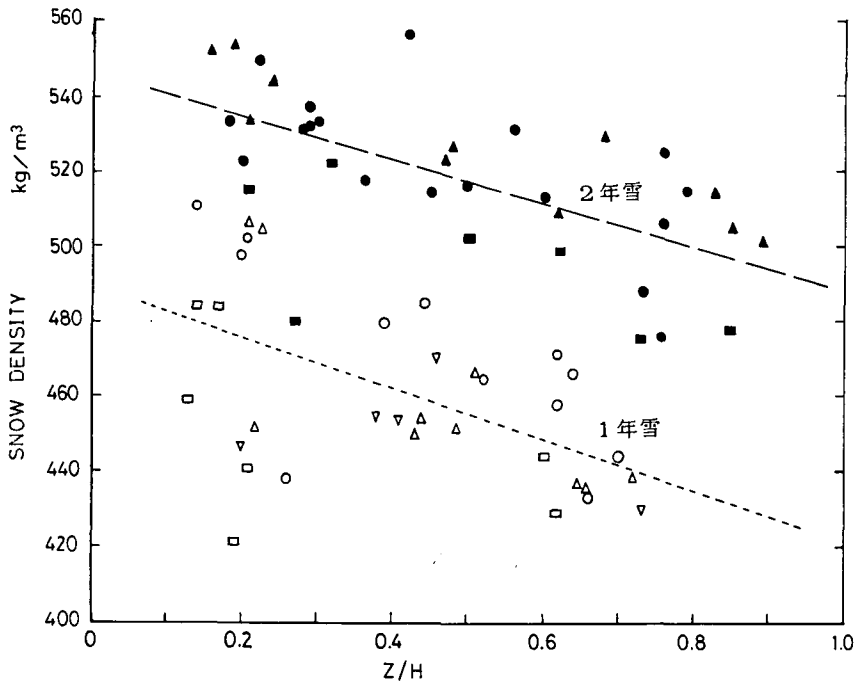
第 8 図 デブリ表面模様の波長の頻度分布

両図から明らかに認められる傾向は次の通りである。

- ① デブリの下層ほど密度が高い。
- ② デブリの厚さの大きい部分ほど密度が高い。

なお、第6図ではデブリ上流に向かうにつれ高密度の傾向が見られるが、他の実験すべてに共通しているわけではない。

上記①、②の傾向をさらに明瞭に示すために、密度測定を行った7回の実験の結果について、堆積板上からの高さ z をその地点の積雪深 H で除し、 z/H と密度 ρ との関係を第9図に示した。



第9図 デブリの密度分布
 z は高さ位置、 H はデブリの厚さ

本図にて、次の点が明らかに認められる。

- a) 密度は 430 kg/m^3 から 555 kg/m^3 の範囲にあり、自然積雪に比べて非常に大きい。

北海道内の平地における乾雪の密度の上限は、堆積後2カ月、積雪深1m以上でも約 350 kg/m^3 である^{10),11)}。また山地の雪庇上部の硬い雪の密度の最大値¹²⁾は 400 kg/m^3 、低温風洞内にて自然雪をふるいにかけて行った吹雪実験の吹きだまり密度の上限は 430 kg/m^3 であった(風速 8 m/s 、室温 -10°C 、高さ 0.1 m の段差後方の吹きだまり雪)¹³⁾。

本混相流実験のデブリ密度は、これらに比べて著しく大きい。

- b) 使用雪が1年雪(○, □, △, ▽印)と2年雪(●, ■, ▲印)とで顕著に密度が異なる。前者の平均値は 462 kg/m^3 、後者の平均値は 518 kg/m^3 である。

雪の平均粒径は1年雪のとき $359 \mu\text{m}$ 、2年雪のとき $544 \mu\text{m}$ であった⁷⁾。また、2年雪の方

が1年雪に比べて粒径分布が非常に広い。このような粒径分布の相違が、堆積時の充填の程度に大きく寄与していると考えられる。

c) z/H が小さいほど密度が大きい。

この関係は、i) 底面に近いほど密度が大きいこと、ii) 同一高さでも積雪深が大きいほど密度が高いこと、の二つの結果を反映している。自然積雪では上記二点は一般的傾向だが、本実験では、堆積後30分以内に密度測定を行っているので、上載荷重による圧密の進行の影響は無視し得る程小さい。

高速ビデオの観測によると、樋を流動中の混相流の厚さは30 mm 前後である。この混相流が濃度不変のまま、幅0.1 mの樋から堆積板へ流出して幅0.8 mに広がったとすると、堆積板上を滑走する混相流の厚さは約4 mmとなる。一方、デブリの厚さは先端、末端を除くと数10 mm 以上である。

デブリ形成の様子は次のように考えることができる。堆積板表面を速度 u で滑走した雪は、デブリの壁に衝突し、雪はデブリの壁に沿って上方に運ばれ、壁およびデブリ表面に堆積する。この過程において、混相流のもつ運動エネルギーの一部は壁付近の雪の圧密に消費される。圧密の規模は底面に近い方が大きい。

デブリの深さの小さい部分は、混相流が衝突する際に、雪の上方への移動および圧縮があまり著しくないと考えられる。このためにデブリ先端、末端の部分は密度が比較的小さい結果を示しているのであろう。

なお、混相流の上流縁が樋内に達した実験では、樋に近い部分のデブリの深さおよび密度はともに大きい結果を示した(実験 #30, 実験 #37)。

IV. ま と め

混相流実験により、停止と堆積過程およびデブリの性質について得られた主な結果を以下にまとめる。

1) 樋から水平面へ流れ出た混相流は角度約60度の範囲内に扇状に広がる。この際、滑走速度は中央線上で最も大きく、両側は小さい。

2) 滑走中の混相流は、クーロン摩擦に加え、速度の二乗に比例する抵抗力をうけて減速していることが示唆される。

3) 混相流の先端部分が停止した後は、停止雪(デブリ)が障害物となり、デブリ上流縁に衝突しつつデブリは上流へ向かって成長する。

4) デブリ表面に見られる波状の起伏模様は、混相流中の濃度などの何らかの振動に起因している可能性が強い。

5) デブリの雪密度は一般の積雪密度に比べて非常に大きい。これは混相流が停止、堆積する過程の加圧焼結現象、および混相流のデブリへの衝突による機械的圧密作用の結果として説明できると考えられる。

謝 辞

本研究をすすめる上で、低温科学研究所気象学部門研究生の竹井 巖氏、大学院生の海老沼孝郎氏と村上茂樹氏、事務補助員の植松泰子さん、新潟大学積雪地域災害研究センターの小林俊一教授と和泉 薫氏、科学技術庁防災科学技術センター新庄支所の佐藤篤司氏、(株)MTS雪氷研究所の西村 寛氏には大変お世話になった。また、実験を遂行する上で御協力いただいた低温科学研究所機関室の辻 五郎氏、三浦武夫氏、伊藤勝美氏および佐々木明氏に心からお礼申し上げる。

文 献

- 1) Voellmy, A. 1955 Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung*, Jahrg. **73**, Ht. **12**, 159-62; Ht. **15**, 212-17; Ht. **17**, 246-49; Ht. **19**, 280-85. (On the Destructive Force of Avalanches. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, *Alta Avalanche Study Center*, Wasatch National Forest, Translation No. 2, 1964).
- 2) Perla, R., Cheng, T. T. and McClung, D. M. 1980 A two-parameter model of snow-avalanche motion. *Jour. Glaciol.*, **26**, No. **94**, 197-207.
- 3) Buser, O. and Frutiger, H. 1980 Observed maximum run-out distance of snow avalanches and determination of the friction coefficients μ and ξ . *Jour. Glaciol.*, **26**, No. **94**, 121-130.
- 4) Bakkehøi, S., Domaas, U. and Lied, K. 1983 Calculation of snow avalanche runout distance. *Annals of Glaciology*, **4**, 24-29.
- 5) Daffern, T. 1983 *Avalanche Safety for Skiers & Climbers*. Rocky Mountains Books. pp. 172.
- 6) 前野紀一・成瀬廉二・西村浩一・竹井 巖・海老沼孝郎・村上茂樹・小林俊一・佐藤篤司・西村 寛 1985 雪氷混相流の研究 I. 雪氷混相流の定義と分類. 低温科学, 物理篇, **44**, 131-137.
- 7) 西村浩一・海老沼孝郎・小林俊一・佐藤篤司・成瀬廉二・前野紀一 1985 雪氷混相流の研究 II. 気相雪氷混相流の実験装置と内部構造. 低温科学, 物理篇, **44**, 139-155.
- 8) 海老沼孝郎・西村浩一・前野紀一 1985 雪氷混相流の研究 III. 雪氷粒子と空気との相互作用. 低温科学, 物理篇, **44**, 157-164.
- 9) 前野紀一 1984 雪氷混相流. 混相流の流動のダイナミクスと応用技術. 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, 35-49.
- 10) 秋田谷英次・遠藤八十一 1982 北海道内平地における積雪特性. 昭和 54-56 年度北海道大学特定研究経費研究成果報告書. 1-17.
- 11) 成瀬廉二・山田知充・秋田谷英次 1985 石狩平野の積雪分布 (1983, 1984, 1985 年). 昭和 57-59 年度北海道大学特定研究経費研究成果報告書.
- 12) Naruse, R., Nishimura, H. and Maeno, N. 1985 Structural characteristics of snow drifts and cornices. *Annals of Glaciology*, **6**, 287-288.
- 13) 西村 寛・成瀬廉二・前野紀一 1983 吹きだまりの形成機構と雪粒子の特性. 昭和 58 年度日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, p. 290.

Summary

The deceleration and accumulation process of a mixed-phase snow flow was investigated, using a motor-driven camera and a high-speed video system set up to observe the process on a horizontal plate joined smoothly to a flow chute, with the following findings: The snow flow decelerated with an increase in drags, which, in addition to the mechanical friction on the

plate, have components proportional to the velocity squared.

A characteristic wavy pattern was formed on the surface of the snow debris; the wavelength was explained by the time variation of flow rates.

The snow debris was hard and its bulk density ranged from 430 to 555 kg/m³. The formation of such large-density snow debris seems to be attributable to the liberation of mechanical energy the moment that the flow comes to a halt.