HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	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
Citation	低温科學. 物理篇, 44, 139-155
Issue Date	1986-03-10
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18525
Type	bulletin (article)
File Information	44_p139-155.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Kouichi NISHIMURA, Takao EBINUMA, Shun'ichi KOBAYASHI**, Atsushi SATO***, Renji NARUSE and Norikazu MAENO 1985 Studies on Mixed-phase Snow. Flows. II. Experimental Apparatuses and Flow Structures. *Low Temperature Science. A, 44.* (With English Summary p. 155)

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 ――

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
(低温科学研究所)

(昭和60年10月受理)

I. はじめに

雪氷粒子を含むすべての流体の運動は,「雪氷混相流」という新しい概念で包括的にとらえることができる[1),2)]。雪氷混相流は,流体の種類により気相雪氷混相流と液相雪氷混相流に大別されるが,このうち前者の典型的な例としては雪崩をあげることができる。

雪崩の発生は,建物,施設,森林さらにはその地域で生活を営む人々に毎年大小の被害を及ぼしており,運動状態にある雪崩のメカニズムとその破壊力(衝撃力)を知ることは,災害防止上の基礎資料として果たす役割は大きい。しかし,雪崩が実際に運動している場面に研究者が遭遇する機会はきわめてまれであることと,その危険性からデータの集積は思うにまかせない状態が続いた。

近年,測定システムと技術の向上に伴い,自然および人工雪崩における衝撃力の測定例が積み重ねられているが,データの解釈についてはまだ議論が多い。

われわれは,雪氷混相流という視点から雪崩をとらえ,流動状態にある雪を連続的に斜面上を滑走させ,各種の物理的測定を行った。本論文では,まずこの実験装置の概要を紹介する。続いて,各種の測定項目のうち衝撃力の値と電気容量法,光透過法による雪氷粒子空間密度の測定結果について述べる。最後に,高速ビデオによる流れの解析結果を加えて,混相流の内部構造について検討する。

II. 雪氷混相流の実験と方法

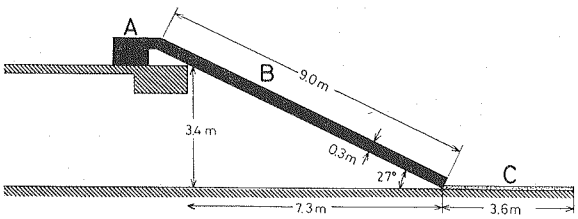
1. 実験装置と実験概要

雪氷混相流のうち雪崩を想定した実験装置の概略を第1図に,また測定器を含めた実験装置の写真を第2図に示す。雪氷混相流を流下させる樋は木製で,その長さは9.0 m,深さは30 cm,幅は10 cmあるいは30 cmである。傾斜角は10度から30度の間で可変であるが,多

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2784号
** 現在 新潟大学積雪地域災害研究センター
*** 現在 科学技術庁国立防災科学技術センター新庄支所

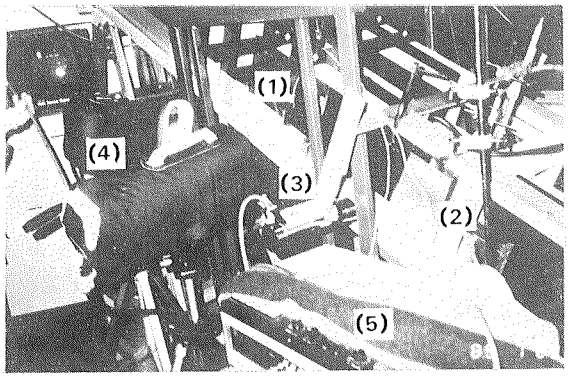
くの実験は27度で行なわれた。装置全体は，大型低温室に設置され−30°Cまで冷却することが可能であるが，本論文の報告は，いずれも−10°Cでの実験結果である。

使用した雪は，自然積雪を採取し，低温室内（−20°C）で保存したものである。以後，採取後の期間により，1年以内のものは1年雪，1年以上のものは2年雪と呼ぶことにする。あらかじめ粒子化された雪は，市販の家庭用除雪機（ミスターパワー，最大除雪能力8.6 t/h，石狩造機(株)製）を改造した雪氷粒子供給装置で流動化された後，雪氷混相流として樋上部より供給される。実験に用いた雪試料の粒径ヒストグラムを第3図に示す。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おり，各ヒストグラムは，700～900個の粒子についての結果である。(a)は1年雪，(b)は2年雪



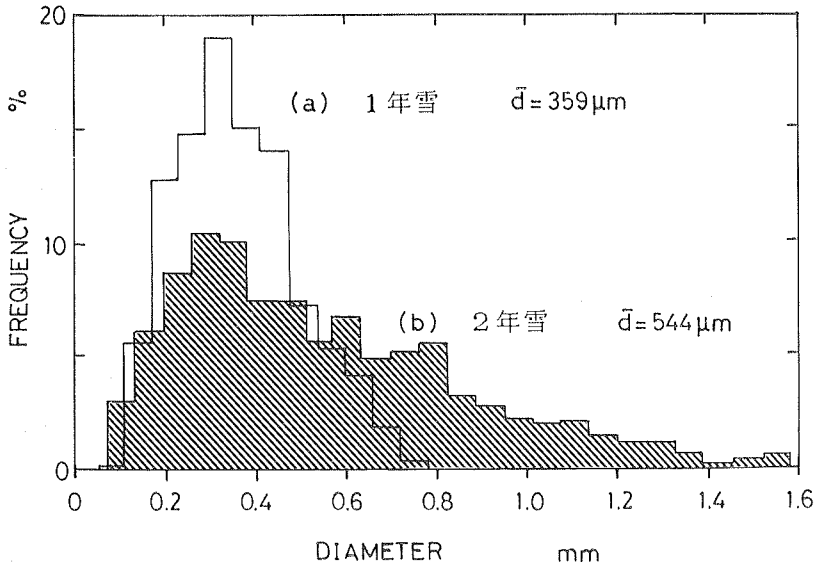
第1図 混相流実験装置

A： 雪氷粒子供給装置
B： 樋（幅10 cmあるいは30 cm）
C： 堆積板（幅182 cm）



第2図 混相流実験用樋と各種測定装置

(1) 衝撃力測定装置
(2) 電気容量法による雪氷粒子空間密度測定装置
(3) 光透過率法による雪氷粒子空間密度測定装置
(4) 高速ビデオシステム
(5) データレコーダ

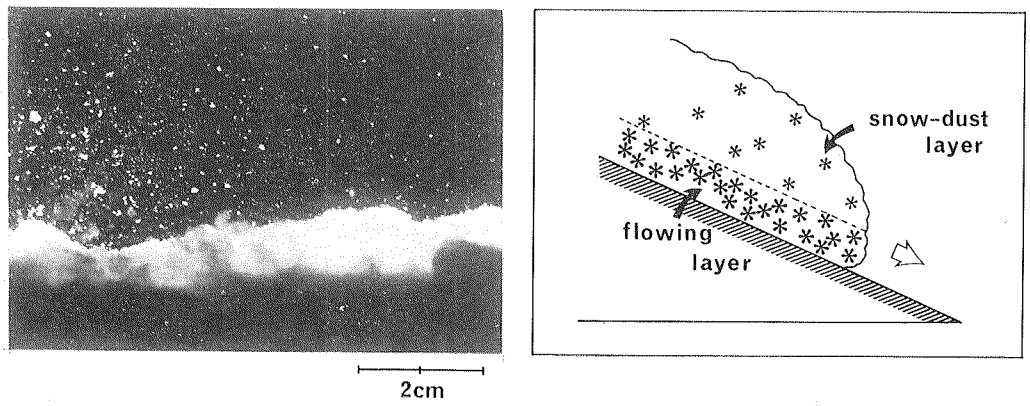


第3図 実験に用いた雪試料の粒径ヒストグラム (a) 1年雪，(b) 2年雪

の分布を示しており，後者が前者に比べて広い粒径分布をもつことがわかる。平均粒径は，1年雪が 359 μm，2年雪が 544 μm であった。

樋の床面には，速度を得ることを目的として，摩擦の小さい超高分子量ポリエチレン・フィルム (UHMW, 三ツ星エンジニアリング製) を貼りつけた。樋の下端には，長さ 3.64 m，幅 1.82 m の平滑な堆積板が水平に接続された。混相流は堆積板の上で停止，堆積の過程をたどる。堆積板の材質は，建築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) であり，表面に塗料を塗布し，滑らかに仕上げた。

第4図は，樋を滑走中の雪氷混相流を発光時間 25 μs のストロボ光で撮影した写真と，流れの模式図である。混相流は，雪氷粒子空間密度の大きい「流れ層 (flowing layer)」と空間密度の小さい「雪煙り層 (snow-dust layer)」からなる。前者の雪氷粒子空間密度は，おおよそ 100～300 kg/m^3，後者のそれは 0.1～10 kg/m^3 である。



第4図 気相雪氷混相流の写真と模式図

第1表 雪氷混相流実験一覧

流動時間：雪氷粒子供給装置の運転時間 (スイッチの ON-OFF 間隔)
ただし，*印は光透過率の記録による。
先端速度：光透過率計による。( ) は高速ビデオによる。また，実験 #75～#84 は，光透過率計と電気容量計を併用。
雪の種類：「I」は1年雪 (1985. 3 札幌市郊外で採取)，「II」は2年雪。
(1), (2)…は，使用1回目，使用2回目，…を意味する。
「新」は未使用雪，「使」は以前使用済の雪を示す。「しまり」はしまり雪の意味。
雪の供給方法：バケツと指示あるものはバケツ，それ以外は雪氷粒子供給装置による。

実験番号	実験年月日	全流量 (kg)	流動時間 (s)	質量速度 (kg/s)	先端速度 (m/s)	雪の種類	備考
#1～#3	1984. 11. 26	—	—	—	—	—	斜面の材質の予備実験 (バケツ)
#4～#8	1985. 1. 18	—	—	—	—	—	雪質の違いの予備実験 (以後，通常ビデオ #4～#21)
# 9	〃	25	34	0.74	5.1	II・新 しまり	
#10	〃	19	22	0.86	4.0	II・新 しまり	

実験番号	実験年月日	全流量 (kg)	流動時間 (s)	質量速度 (kg/s)	先端速度 (m/s)	雪の種類	備考
#11	1985. 1.18	29	24	1.21	3.6	II・新しまり	粒径分布（ストロボ）
#12	〃	9	16	0.56	5.1	II・新しまり	
#13	〃	41	41	1.00	5.1	II・新しまり	受圧板（通常ビデオ）
#14	1985. 3. 1	17	21	0.81	4.5	II・新しまり	特製ノズル使用
#15	〃	20.6	13.2	1.56	4.5	II・新しまり	同上
#16	〃	30.3	31	0.98	4.5	II・新しまり	同上
#17	〃	32.6	32	1.02	4.5	II・新しまり	同上，STV 撮影
#18	〃	34.1	25	1.36	4.5	II・新しまり	同上
#19	〃	—	—	—	—	II・新しまり	同上，閉塞
#20	〃	10	16	0.63	6.0	II・新しまり	雪閉塞 特製ノズル使用
#21	〃	37.5	26	1.44	—	II・新しまり	パイプ，ノズル
#22	〃	43.0	28	1.54	6.0	II・新しまり	
#23	〃	89	30.5	2.92	6.0	II・新しまり	
#24	〃				6.0	II・新しまり	
#25	1985. 4.19	10.9	5	0.73	(4.5)	I・新しまり	雪ブロック飛散 （以後，高速ビデオ使用）
#26	〃		10		5.14 (5.2)	I・新しまり	
#27	〃	17.4	15	1.16	4.5 (5.3)	I・新しまり	
#28	〃	19.7	23	0.86	5.14	I・新しまり	ストロボ撮影
#29	〃	16.8	13	1.29	7.2 (5.5)	I・新しまり	
#30	〃	25.0	26	0.96	6.0 (6.0)	I・新しまり	色素混入（3秒毎）
#31	〃	33.8	35	0.97	6.0 (6.4)	I・新しまり	
#32	〃	27.2	28	0.97	6.0 (6.2)	I・新しまり	
#33	〃	13.8	15	0.92	6.0 (6.3)	I・新しまり	
#34	〃	17.7	20	0.89	6.0	I・新しまり	ストロボ撮影
#35	〃	31.4	30	1.05	4.5 (6.1)	I・新しまり	受圧板（高速ビデオ）
#36	〃	19.0	20	0.95	6.0	I・新しまり	停止過程（高速ビデオ）
#37	〃	24.2	25	0.97	5.14 (5.7)	I・新しまり	色素混入

実験番号	実験年月日	全流量 (kg)	流動時間 (s)	質量速度 (kg/s)	先端速度 (m/s)	雪の種類	備考
#38	1985. 6.11	26.0	21	1.24	3.6	II・新しまり(1)	メカニカルシャッター使用(高速ビデオ)
#39	〃	27.7	18	1.54	6.0 (4.8)	II・新しまり(1)	
#40	〃	38.5	26.5	1.45	4.5 (5.0)	II・新しまり(2)	
#41	〃	18.3	15.6	1.17	4.5 (4.2)	II・使しまり(1)	
#42	〃	25.1	21	1.20	6.0 (4.8)	II・使しまり(1)	
#43	〃	35.8	19	1.88	5.0 (4.7)	II・使しまり(1)	
#44	〃	38.7	15	2.58	5.0 (5.4)	II・使しまり(2)	
#45	〃	60.0	30.5	1.97	5.0 (5.6)	II・使しまり(3)	
#46	〃	52.7	21.8	2.42	4.5 (5.0)	II・使しまり(4)	
#47	〃	25.5	22	1.16	4.5 (5.9)	雪小ブロック ϕ_{max} 5～7cm	
#48	〃	54.2	23.2	2.34	4.5	II・使しまり(4～5)	メカニカルシャッター使用(高速ビデオ)
#49	1985. 6.12	31.4	17	1.85	4.5 (5.4)	I・使しまり(1)	メカニカルシャッター使用(高速ビデオ)
#50	〃	16.4	9.5	1.73	6.0 (5.3)	I・使しまり(1)	メカニカルシャッター使用(高速ビデオ)
#51	〃	26.8	13	2.06	5.0 (5.3)	I・使しまり(2)	
#52	〃	29.3	14	2.09	6.0 (5.4)	I・使しまり(3)	
#53	〃	17.6	20	0.88	4.5 (5.0)	I・使しまり(4)	
#54	〃	2.0	0.6	3.33	9 (4.9)	I使＋I新しまり	バケツ，光透過率計検定
#55	〃	1.7	0.9	1.89	4.5 (5.1)	I使＋I新しまり	バケツ，光透過率計検定
#56	〃	3.4	0.9	3.78	6.0 (5.4)	I使＋I新しまり	バケツ，光透過率計検定
#57	〃	5.1	1.8	2.83	4.5 (5.0)	I使＋I新しまり	バケツ，光透過率計検定閉塞
#58	〃	5.05	1.1	4.59	5.0 (5.2)	I使＋I新しまり	バケツ，光透過率計検定
#59	〃	8.2	1.5	5.47	5.0 (5.7)	I使＋I新しまり	バケツ，光透過率計検定
#60	〃	12.6	1.8	7.00	5.0 (5.5)	I使＋I新しまり	バケツ，光透過率計検定
#61	〃	12.6	1.7	7.41	5.0 (5.1)	I使＋I新しまり	バケツ，光透過率計検定
#62	1985. 7.23	3.6	4(?)	—	4.7	I・新しまり	雪飛散
#63	〃	18.8	11	1.71	5.1	I・新しまり	

実験番号	実験年月日	全流量 (kg)	流動時間 (s)	質量速度 (kg/s)	先端速度 (m/s)	雪の種類	備考
#64	1985. 7.23	34.1	11	3.10	5.0	I・新しまり(2)	
#65	〃	32.6	9.8	3.33	4.6	I・新しまり(2)	
#66	〃	31.6	10(?)	—	4.4	I・新しまり(3)	樋閉塞
#67	〃	33.7	14.6	2.31	4.6	I・新しまり(4)	色素混入
#68	〃	29.8	10	2.98	4.0 (5.1)	I・新しまり(5)	
#69	〃	28.7	11	2.61	5.3	I・新しまり(6)	
#70	〃	27.6	9.5	2.91	6.2	I・新しまり(7)	
#71	〃	45.1	8.2	2.93	3.7	I・新しまり(8)	ストロボ撮影
#72	〃		7.2		4.3	I・新しまり(8)	ストロボ撮影
#73	〃	30.8	12.6	2.44	—	I・新しまり(9)	高速ビデオによる平均速度 5.1 m/s
#74	〃	46.2	20.3	2.28	— (6.1)	I・新しまり(10)	色素混入，高速ビデオによる平均速度 4.7 m/s
#75	1985. 7.24	33.4	12.7	2.63	2.4*	I・新しまり(11)	俯瞰撮影 (高速ビデオ)
#76	〃	30.9	10.6	2.92	2.8*	I・新しまり(12)	俯瞰撮影 (高速ビデオ)
#77	〃	32.3	11.8	2.74	—	I・新しまり(13)	俯瞰撮影 (高速ビデオ)
#78	〃	31.7	12.1	2.62	4.1	I・新しまり(14)	俯瞰撮影 (高速ビデオ)
#79	〃	34.7	17.5	1.98	4.2	I・新しまり(15)	色素混入
#80	〃	33.4	18.0	1.86	4.0	I・新しまり(16)	樋出口での撮影 (高速ビデオ)
#81	〃	2.6	≒1	—	3.5	I・新しまり(16)	バケツ
#82	〃	2.8	<1	—	3.5	I・新しまり(16)	バケツ
#83	〃	5.3	7	0.76	3.6	I・新しまり(16)	バケツ
#84	〃	7.9	≒1	—	3.7	I・新しまり(16)	バケツ

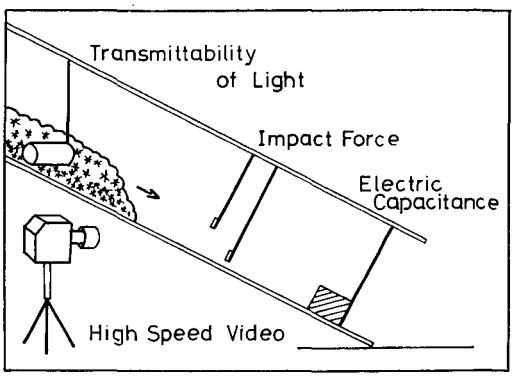
以上のような，流動化，流動，停止という3つの物理過程において，速度，衝撃力，空間密度，静圧，粒径，電荷量の測定をおこなった。各種の測定項目のうち，本論文においては，衝撃力，雪氷粒子の空間密度，高速ビデオシステムによる観測について述べる。雪氷混相流中の気流の速度，静圧については「雪氷混相流の研究 III」[3]，停止，堆積過程については「雪氷混相流の研究 IV」[4] を参照されたい。

なお，本論文を含め，今回の報告全体[2)~4)] に関連する実験の概要を第1表にまとめた。ここで流動時間とは，雪氷粒子供給装置の運転時間，あるいは光透過率計から求めた混相流の流動持続時間である。質量速度は，実験に使用した雪の総質量を流動時間で割った値である。混

相流の先端速度は，180 cm の間隔で設置された2つの光透過率計から求めた。ただしいくつかの場合は，高速ビデオの画面から求めた。

2. 衝撃力の測定

衝撃力は，1 cm×2 cm の受圧面を付けた小型荷重変換器（共和電業，LM-A）を流れの方向に垂直な面内に設置して測定された（第2図，第5図参照）。動歪測定器（共和電業，DPM-110B）を通して得られた力は，データレコーダ（共和電業 RTP-500A）に記録された。



第5図 衝撃力および雪氷粒子密度測定装置の模式図

雪煙り層内での測定は，雪粒子を空中に舞い上げながら流れ下る煙り型雪崩，流れ層内での測定は，雪が滑り面を滑りあるいは転がるように流れる流れ型雪崩の衝撃力に対応できると考え，荷重変換器の床面からの高さは，混相流の流れ層と雪煙り層の厚さに対応して変化させた。

3. 雪氷粒子の空間密度の測定

混相流の内部構造を調べる手段として，第2図および第5図に示す2種類の方法で雪氷粒子の空間密度とその時間変動の測定を行った。

このうち電気容量法では，長さ5 cm，高さ2 cm あるいは7 cm の2種類の平行電極を流れに沿って設置する。電気容量の変化は，電気容量型変位計（岩通，ST-3501）を用いて測定され雪粒子の空間密度に変換される。高さが2 cm の電極では流れ層内，7 cm の電極では流れ層と雪煙り層を含めた領域の空間密度が測定される。

光透過率法では，センサーを流れ層と雪煙り層の境界付近に相当する床面から5.5 cm の高さに設置し，光透過率計（牧野応用測器，飛雪観測装置）によって混相流中の雪氷粒子密度の変動を測定した。なお，電気容量法，光透過率法のデータは，衝撃力と同様にデータレコーダに記録された。

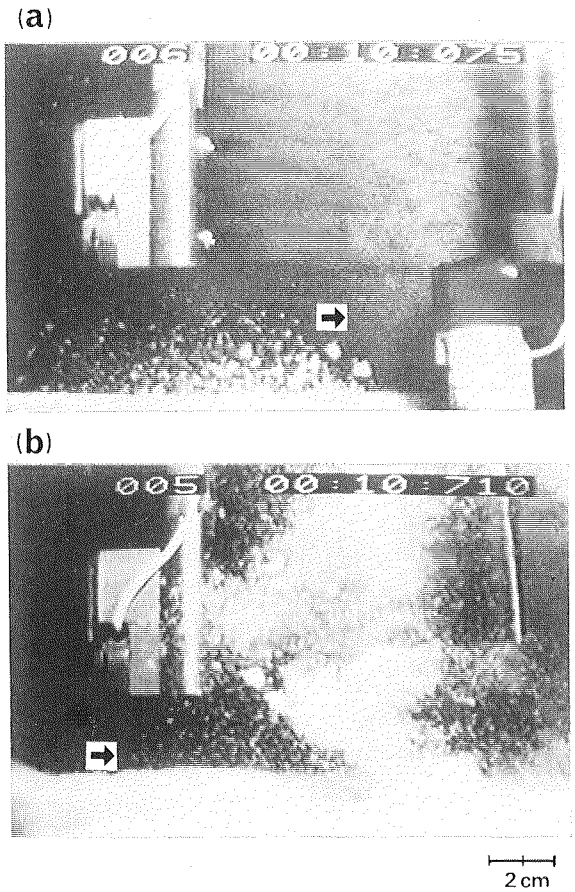
4. 高速ビデオシステムによる観測

高速ビデオシステム（ナック，HSV-200）を用いて混相流を撮影し，1/200 秒毎の再生画像から，先端速度，流れの状態，雪粒子が衝撃力測定用の荷重変換器に衝突する様子，さらには流れ層，雪煙り層，混相流先端部における個々の雪粒子の運動について解析を行った。

III. 実 験 結 果

1. 衝 撃 力

高速ビデオにより撮影した雪氷混相流および衝撃力測定用装置の映像を第6図に示す。画面上では樋の床面は水平であるが，実際は27度右下がりの傾斜面で，混相流は図中に付した矢印に示すように左から右方へ向かって流れている。第6図において，(a)は流れの先端が荷重変換器（写真には2個の変換器が写っているが，いま問題にしているのは右下の変換器である）



第6図 雪氷混相流と衝撃力測定装置
(a) 流れの先端が荷重変換器(写真の右下)に衝突する直前の状況
(b) 流れ層が受圧板に衝突している様子。図中の矢印は流れの方向を示す。
(a), (b)は共に高速ビデオシステムの画像である。

に衝突する直前の様子を，また(b)は，粒子密度の大きい流れ層が受圧板に衝突している状況をそれぞれ示している。

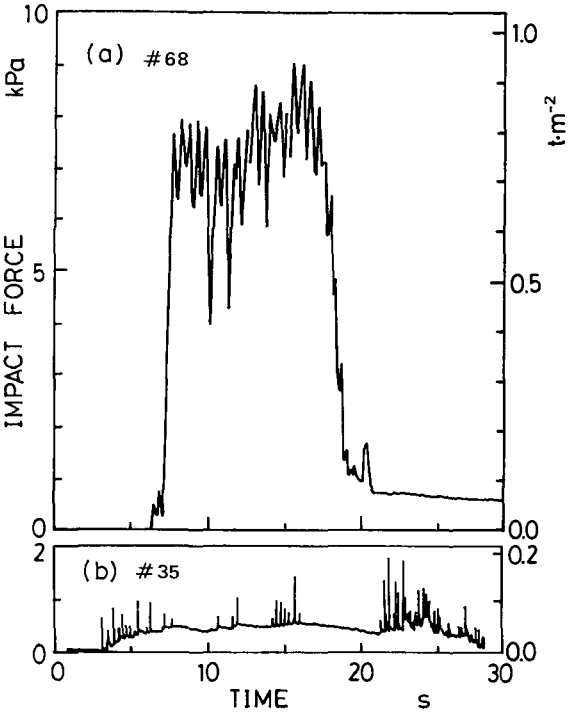
混相流の衝突に伴う衝撃力の測定記録のうち典型的な例を第7図に示す。(a)は受圧板の中心を床面から1 cmの高さに設置し，雪粒子密度が比較的大きい流れ層内の衝撃力を測定した結果である。第6図の任意時間軸6秒付近での衝突に伴い，衝撃力は約8 kPaにまで急激に立ち上がり，その後4～9 kPaの間で変動を繰り返した。ただし，1 kPa＝10^3 N/m^2≃0.1 ton/m^2＝10 g/cm^2。

約15秒間の混相流の流動時間の後(時間軸上では約20秒以後)も，衝撃力は零とならず，約1 kPaという値を維持しているが，これは，下流から成長してきたデブリがセンサーを埋め，静荷重を記録しているためである。

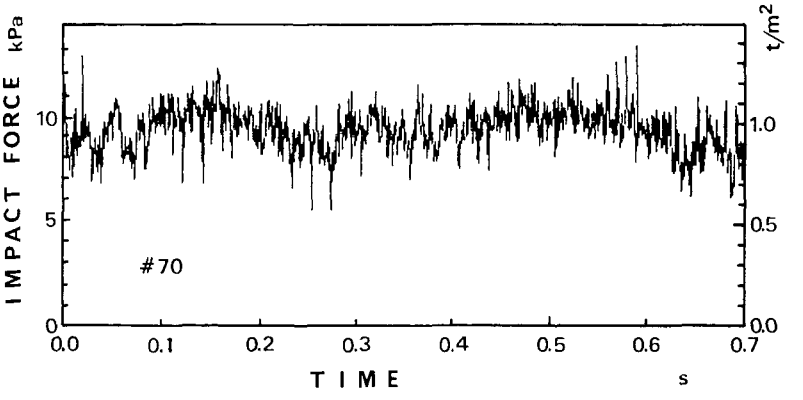
第7図(b)は，受圧板の中心を床面から2 cmの高さまで引き上げた際の記録例であり，混相流の流動時間は約25秒間であった。粒子密度の小さい雪煙り層最下部に相当するため，衝撃

力の大きさは2kPa以下で(a)に比べて小さい。記録上にスパイク状の波形が見られるが，これは，流量の変化に伴う厚い流れ層の断続的な衝突に対応することが，高速ビデオの画像と対比させることで確認された。

次に，第7図(a)に示したような流れ層内の衝撃力の記録のうち，実際に雪が荷重変換器に衝突している区間について時間軸を拡大した例を，第8図に示す。これによると，流れ層内の衝撃力は，5～13kPaの範囲で短波長成分をもった変動を繰り返していることがわかる。また，さらに時間軸の拡大を行った結果，各々の変動は，急激な立ち上がりとそれに続くややゆっく



第7図 衝撃力の記録例
(a) 流れ層内の衝撃力 (b) 雪煙り層最下部の衝撃力

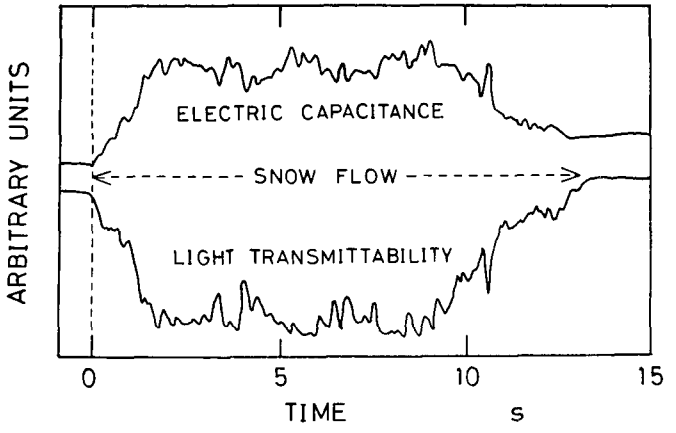


第8図 衝撃力の記録例

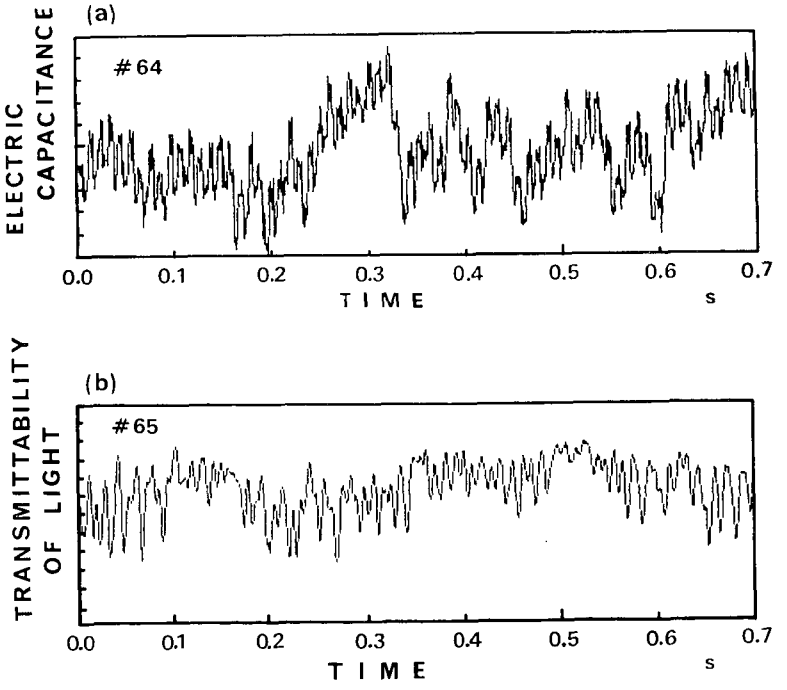
りとした緩和現象が重ね合わされて構成されていることがわかった。

2. 雪氷粒子の空間密度の変動

混相流内の雪氷粒子の空間密度を，電気容量法と光透過率法により測定した結果の例を第9図に示す。縦軸は電気容量および光透過率の記録をそのまま任意スケールで示しており，各々は雪粒子の空間密度に比例する。センサーが流れの中に入るに伴い，電気容量は増大，光透過率は減少する様子がわかる。



第9図　雪氷粒子の密度変動の記録例



第10図　雪氷粒子の密度変動の記録例
(a) 電気容量法　(b) 光透過率法

これらの記録について衝撃力の場合と同様に時間軸を拡大したものが，第10図である。(a)が電気容量法，(b)が光透過率法の記録である。対象とする高さが，前者は床面から2 cm高まで，後者は5.5 cm高と相違はあるが，両測定法の結果とも雪粒子密度が第8図の衝撃力の記録と同様に短い周期の変動を繰り返していることがわかる。

IV. 考　　察

1. 雪崩衝撃力との比較

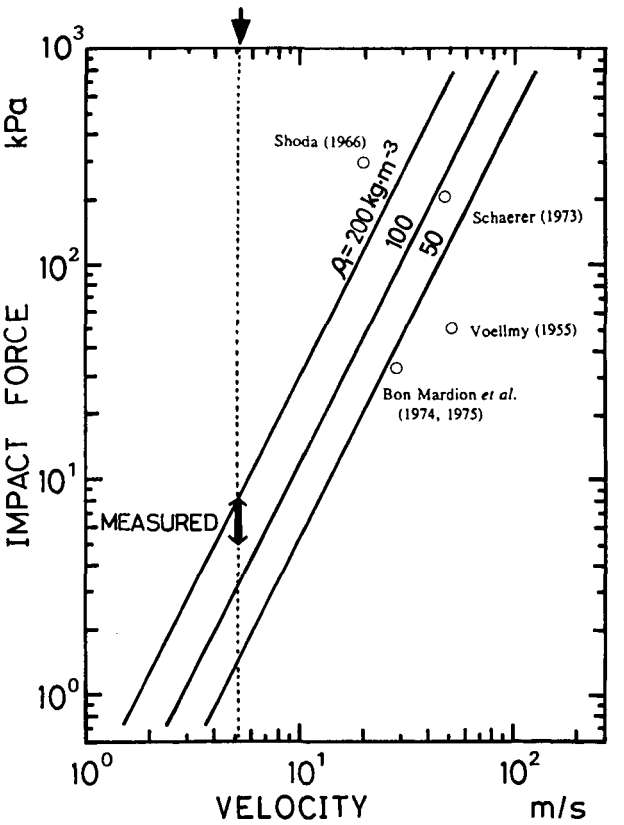
雪氷混相流の実験結果をもとに，雪崩衝撃力の議論をすすめるためには，あらかじめ，両者を支配する要因が同一であるか否かについて大まかな検討を行っておく必要がある。雪崩衝撃力の一般的解釈としては，雪塊が受圧板に衝突した瞬間より雪塊の圧縮が開始され，塑性波が進行するという考え方がある[5]。いま，衝撃力の大きさをP，雪塊の速度をu_1，塑性波通過前後の雪の密度をそれぞれρ_1, ρ_2とすると，塑性波通過前後における質量保存と運動量保存の条件から，衝撃力と速度（流速）の関係は次のようになる。

$$P=\rho_1\left(1+\frac{\rho_1}{\rho_2-\rho_1}\right)u_1^2 \qquad (1)$$

ただし，塑性波の通過後，つまり受圧板前面では雪塊の速度は零とした。

(1)式において，ρ_2の値を雪粒子の機械的充填の極限と考えられている550 kg/m^{3}とし，ρ_1がそれぞれ，50, 100, 200 kg/m^{3}の場合についてPとu_1の関係をあらわした結果を第11図に示す。図上には，さらにVoellmy (1955)[6], Shoda (1966)[7], Schaerer (1973)[8], Bon Mardin *et al.* (1974, 1975)[9]によって測定された雪崩衝撃力の値をプロットした。いずれの実測値とも，図中の計算曲線の近傍に位置しており，(1)式が雪崩衝撃力を評価する上で有効であることがわかる。

次に，今回の実験により求められた雪氷混相流の衝撃力の大きさと，(1)式の関係について考察する。測定例として，先に衝撃力の



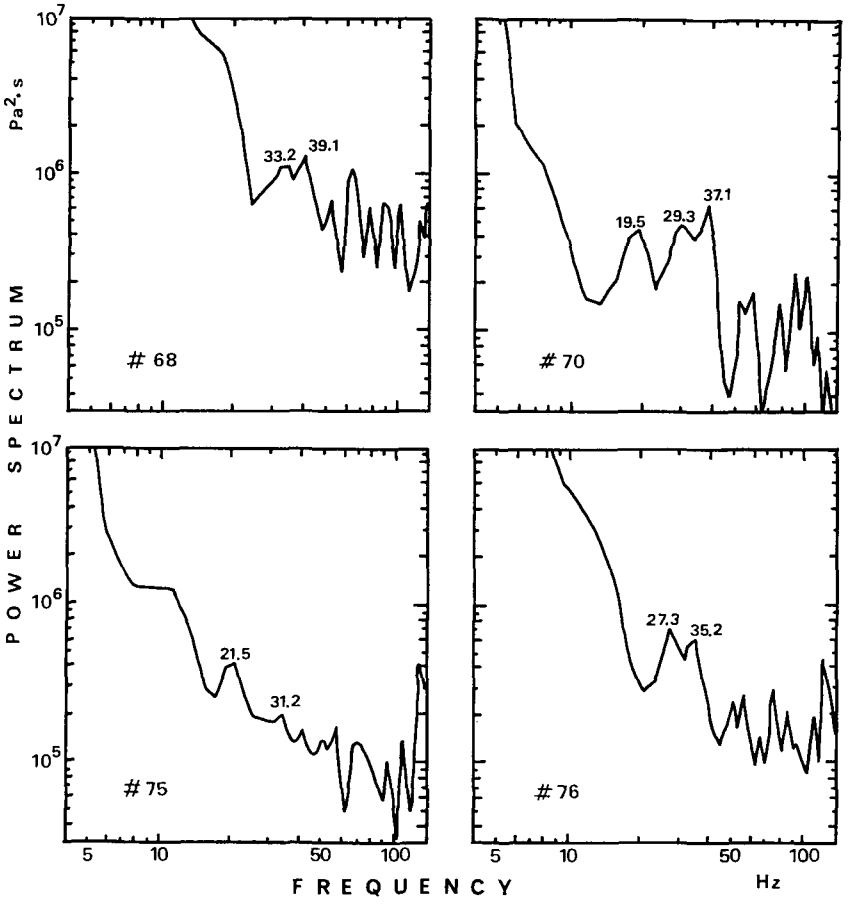
第11図　雪崩衝撃力と流速の関係

記録例を示した（第7図(a)）実験#68の場合を考える。実験#68の速度は，高速ビデオの画像解析から，u_1=5.1 m/s である。さらに，流動時間，総流量，層高のデータを用いると，流れ層の平均的な密度は，ρ_1=150～200 kg·m^{-3}と計算される。u_1, ρ_1, ρ_2の値を，(1)式に代入すると衝撃力の大きさは，P=5.4～8.2 kPa となる。この値は，第11図上にも示すように，荷重変換器により測定された衝撃力（5～8 kPa）と非常に良く一致し，雪氷混相流実験により得られた衝撃力の値が，実際の雪崩の場合と同様に(1)式で説明されうることがわかる。

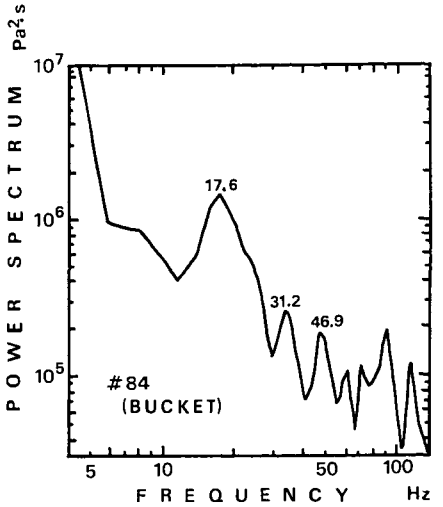
第11図中にも示したように，混相流実験より得られた衝撃力の大きさは，実際の雪崩衝撃力に比べ，1/10～1/100程度である。しかし，上記の検討結果から，大きさの相違は速度の違いによると解釈され，衝撃力をもたらすメカニズムは，自然雪崩，人工雪崩，混相流実験において基本的に同一であると結論できる。

2. 衝撃力と雪粒子密度の変動

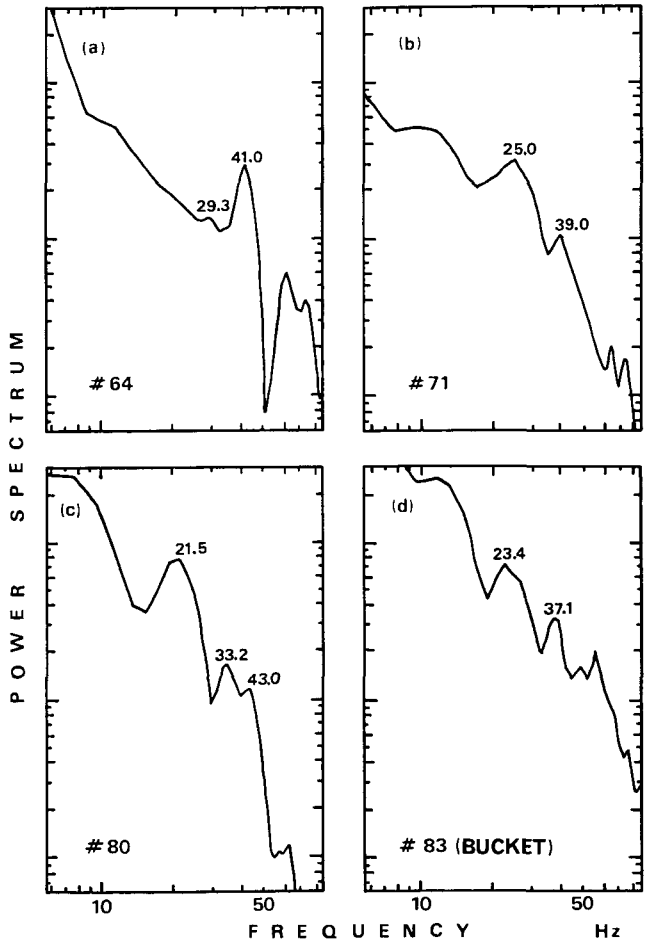
雪氷混相流内の衝撃力の値は，第8図に見られるように，短波長成分を含む時間変動を示す。この変動に関して定量的な評価を行うことを目的として，衝撃力のアナログデータを500 μsecのサンプリング間隔でデジタル化し（オートニクス，S210型オート・デジタイザ），FFT法



第12図　衝撃力変動のパワースペクトル



第13図　衝撃力変動のパワースペクトル



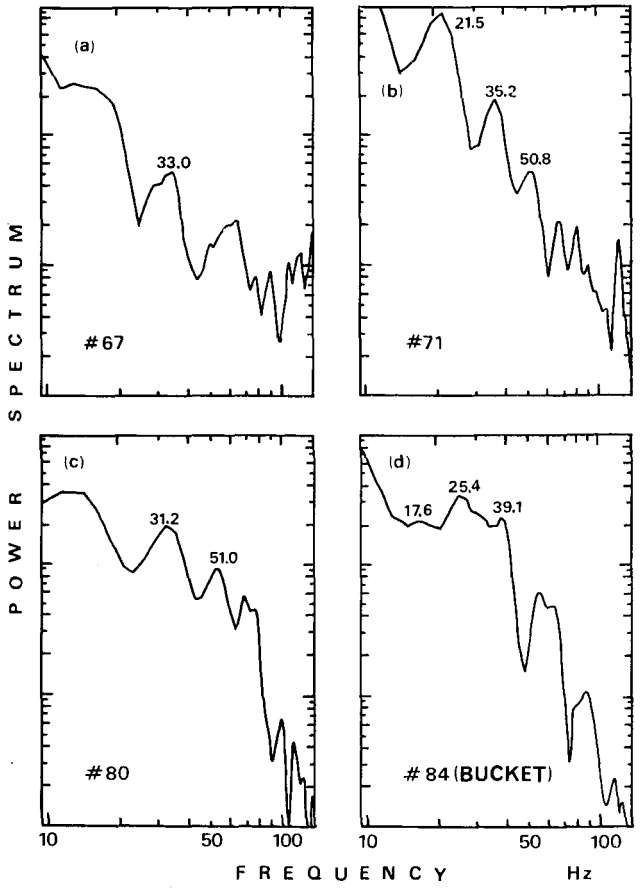
第14図　電気容量法により求めた雪氷粒子の密度変動のパワースペクトル

(高速フーリエ変換) を用いてスペクトル解析を行った。実験 #68, #70, #75, #76 の 4 例について, パワースペクトルの計算結果と周波数の関係を両対数グラフ上に示したものが第 12 図である。

4 例ともに直流成分に加えて, 20～40 Hz 付近に卓越周期が存在することがわかる。このような共通の卓越周期があらわれる原因としては, まず雪の流動化に用いた小型除雪機のロータリー部分の回転の影響が考えられるが, モーターの回転数, 羽根の数等から, この周期を説明することはできない。

次に, 雪供給装置の機械的な影響を除去することを目的として, あらかじめ粒子化した雪をバケツに満たし, これを樋上に直接流下させる実験を行った。バケツによる実験から得られた衝撃力の記録を, 前述と同様の方法でスペクトル解析した結果が第 13 図である。バケツにより流下させた場合も, 卓越成分のあらわれる周波数帯は, 第 12 図の結果とほぼ同一であることがわかる。このことから, 20～40 Hz 付近の卓越周期は, 流動化装置の機械的影響をうけたものではなく, 雪氷混相流の衝撃力変動に共通する特徴と考えることができる。

一方, 雪氷混相流の特徴としては, 他の混相流に比べ流れを形成する雪粒子と空気の密度差が比較的小さく両者の相互作用が大きい。また雪粒子間の付着力が大きいため粒子間の相互



第 15 図 光透過率法により求めた雪氷粒子の密度変動のパワースペクトル

作用も大きいという点があげられる[2]。このため，雪氷混相流の内部は，雪塊の形成，衝突，破壊が繰り返されるなど，複雑な構造をもつことが予想される。事実，第10図に示すように，雪氷粒子の空間密度は短周期の変動を繰り返しており，これと先にスペクトル解析を行った衝撃力との間には密接な関係があると考えられる。

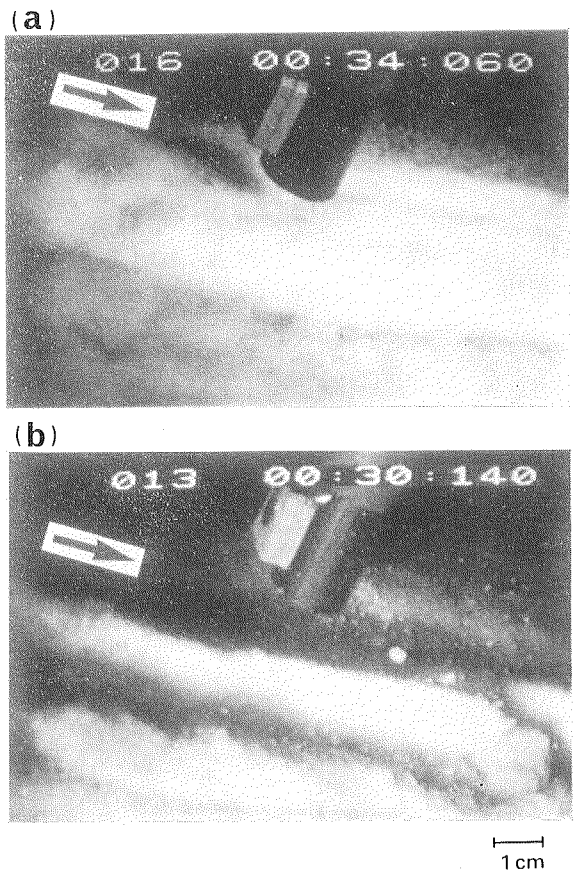
そこで，電気容量法および光透過率法を用いた雪氷粒子の密度変動の測定結果について，衝撃力と同様にスペクトル解析を行った。計算結果を第14図（電気容量法）および第15図（光透過率法）に示す。両図において，(a)～(c)は雪粒子供給装置により流動化させたもの，(d)はバケツ法の結果である。衝撃力の解析結果に見られた20～40 Hz付近の卓越周期が，密度変動の解析結果上にもあらわれていることがわかる。

次に，雪氷粒子の空間密度変動の実態を調べるため，雪氷混相流をやや上方から俯瞰する方向に高速ビデオを設置し，撮影を行った。このときの映像の例を第16図に示す。(a)は照明を下流側からあてたものであるが，流れの表面は一様ではなく，ちょうど筋状の積雲群を上空から眺めたような様相を呈している。(b)は上流側から照明を当てており，(a)とは様相がやや異ってみえるが，いずれの場合も，流下方向に伸びた細長いユニットにより流れが構成されているようすがわかる。

この流れのユニットの長さ(L)を高速ビデオの画面上から測定し（実験#74，ユニット総数126個），長さの度数分布を第17図(a)に，高速ビデオより求めた流れのユニットの速度Uと流れのユニットの長さLの比，$F=U/L$，すなわち周波数(F)の度数分布を第17図(b)に示す。この図によれば流れのユニットは，約5～20 cmの長さをもち，さらに周波数に換算すると，30～60 Hzの範囲に極大値が存在することがわかる。この周波数の値は，衝撃力や粒子密度の変動についてスペクトル解析を行った際にあらわれた卓越周波数域とほぼ一致する。

以上の結果より，流れ層内における衝撃力や雪氷粒子密度の変動（第8図，第10図）は，高速ビデオ画像より見い出された雪氷混相流内に形成される細長い流れのユニットに起因していると結論される。

次の課題は，雪氷混相流内において，



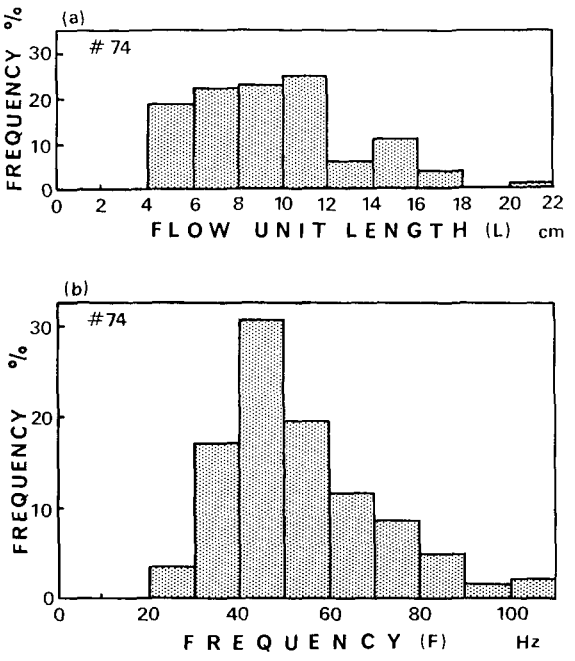
第16図 高速ビデオシステムによる雪氷混相流の俯瞰撮影

光源を(a)は下流側，(b)は上流側に設置し撮影を行った。

この流れのユニットが形成される物理的機構と，その大きさを規定する要因を求めることにある。先に述べたように，雪氷混相流は，他の混相流に比べ，(1)粒子間相互作用，(2)空気・粒子間相互作用が共に大きいという特徴がある。仮に，流れのユニットが，これらの特徴を反映して形成されるとすると，以下に記した2種類の生成過程を考えることができる。

(1) 粒子間の相互作用，つまり付着力の大きさに対応した，ある大きさのユニットが形成され，それがそのままの形を維持して流下するか，もしくは，衝突，破壊，生成の過程を繰り返しながら流れ下る。

(2) 流れにシヤーが存在し，かつ下向きの静圧勾配をもつ[3]という状況を反映して，空気の流れが，細長い細胞を生成する。この流れに追随する形で雪粒子が運動し，流れ層内にユニットが形成される。



第17図 混相流中に見られる流れのユニットの長さ
(a) 長さの度数分布
(b) 周波数換算値(F)の度数分布
$F=U/L$, U: 速度, L: 流れのユニットの長さ

しかし，現時点においては，上記の(1), (2)を説明するような実験的事実は，ともに観測されていない。今後は，高速ビデオシステム等を用いて，個々の粒子の運動，速度勾配等の解析を進めるとともに，今回見い出された流れのユニットの形成について理論的な考察を行っていく予定である。

謝　辞

本研究をすすめるにあたり，低温科学研究所気象学部門研究生の竹井巌氏，大学院生の村上茂樹氏，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和泉薫氏，(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，実験を手伝って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感謝いたします。

なお，本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弁された。

文　献

1) 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，35-49.

2) 前野紀一・成瀬廉二・西村浩一・竹井　巌・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.

3) 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.
4) 成瀬廉二・西村浩一・前野紀一 1985 雪氷混相流の研究 IV. 停止と堆積. 低温科学, 物理篇, **44**, 165–176.
5) Mellor, M. 1978 Dynamics of snow avalanches. *In* Rockslides and Avalanches, (ed. B. Voight and others). Vol. **1**, Elsevier, Amsterdam, 753–792.
6) 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).
7) Shoda, M. 1966 An experimental study on dynamics of avalanching snow. *IUGG-IASH Pub.* No. **69**, 215–229.
8) Schaerer, P. A. 1973 Observation of avalanche impact pressures. U. S. Dept. of Agriculture, Forest Service. General Technical Report RM-3, 51–54.
9) Bon Mardion, G., Coche, G., Eybert-Berard, A., Jourdan, P., Perround, P. and Rey, L. 1974 Measures dynamiques dans l'avalanche. Premiers resultats experimentaux. *CENG/ASP* No. **74-01**. Centre d'Etude de la Neige, Grenoble, France.

Summary

A snow-avalanche is a typical example of the two-phase flow composed of air and snow particles.

A mini-avalanche system has been constructed in a cold laboratory to look into various physical properties of mixed-phase snow flow. A mass of sifted and fluidized snow particles was set to flow down in a chute, which is 9.0 m long, 0.1 m or 0.3 m wide and 27° inclination. The snow was then allowed to run down and finally come to a halt on a horizontal board smoothly connected to the exit of the chute. All the measurements were conducted at −10°C.

The following were measured: flow velocity and particle motion using a high-speed video system; time variation in impact force using load cells of the strain-gauge type; particle concentration by measuring the electric capacitance or light transmittability, etc.

Analyses of the obtained data showed the following results:

(1) In the mixed-phase snow flow, impact force is caused by the same mechanism as snow avalanches in nature.

(2) The mixed-phase snow flow was found to be composed of characteristic flow units, 5～20 cm long, which seem to cause oscillations of impact force and particle concentration observed in the flowing layer.