

雪泥流の衝撃力測定実験

上石 勲・小林 俊一・和泉 薫

Experimental Study on Impact Force of Slushflow

by

Isao KAMIISHI, Shun'ichi KOBAYASHI and Kaoru IZUMI

I はじめに

雪泥流災害は、富士山に融雪期に度々発生するものに関しては「雪代（ゆきしろ）」という名前で古くから記録が残されている（安間；1993）。しかし、その他で発生した雪泥流災害は、これまでは融雪による鉄砲水として報道され（小出；1981）、そのまま片付けられてきたためにその実態については不明な点が多いのが現状であった。

最近の暖冬少雪の続く年にもこの種の災害が発生しているのは注目に値する。例えば、平成2年（1990年）2月11日午後2時40分頃、長野県桐池スキー場のから沢にかかっていた仮橋が雪泥流に流され、ちょうど橋を渡っていた若いスキーヤー2名が事故に遭い死亡した（小林他；1993）。平成4年（1992年）3月1日には、大きな河川である黒部溪谷を雪崩が堰止めたいくつかの雪ダムが決壊して大規模な雪泥流となって黒部川第三発電所仙人谷ダムを直撃し、1名の死者と1名の重傷者を出すとともに発電所施設にも多大の被害を与えた（川田他；1993）。

雪泥流は雪崩のようにはっきりしたテプリを残さないために不明な点が多い。そこで、以下に述べる実験室において雪泥流の衝撃力の測定実験を行い、雪泥流の衝撃力特性とその対策の基礎資料となるデータを得ることができた。

II 雪泥の物理的性質

積雪は水を含むと急に雪粒子の形状を変え、丸く大きな粒子に変化していくとともに粒子間の結合点が少なくなり、積雪の強度を急に減少させる。雪泥流の発生には、水を含んだ場合の積雪の強度低下は重要である。

これまで、雪泥の物理的性質として圧縮強度、圧縮粘性係数、粘性係数が計測されている。水の量が増えると急に強度や圧縮粘性係数の低下を示し、粘性係数は水を含むと急に値は小さくなり、雪は変形して流動しやすくなることが示された。また、ずり速度が大きくなると急に0℃の水の粘性係数に近づき流動状態がよくなることがわかった。すなわち、発生の瞬間では雪泥は粘ばっこいが、運動状態になると急に水に近い運動状態になる、擬塑性流体（pseudoplastic）であることがわかった。擬塑性流体の場合は、ずり速度が大きくなると粘性係数が急に小さくなるので構造（流体の凝集性）が壊れるためだと考えられた（Kobayashi et.al, 1989；Kobayashi et.al, 1992；上石他, 1994）。

本研究では、雪泥の衝撃力測定実験によって運動中でもこの凝集性が保存されていることが明らかにされた。

III 実験方法

実験は室温0℃の低温室内に、図-1に示した斜面流実験装置（鈴木・藤田；1983）を設置して行った。あらかじめ保存雪と水をよく混ぜ合わせて作成しておいた雪泥を斜面上部の雪泥保存槽に注入し、仕切り板を一気に取り外すことによって雪泥流を発生させた。斜面の下端に直径1.1cm（受圧面積0.95cm²）で500gfまで測定可能なロードセルを取り付けて雪泥と水の衝撃力の比較測定を行った。ロードセルからの記録は動歪み測定器（日本電気三栄）を通して、データレコーダー（SONY，型式PC 204）によって10kHzのサイクルでデジタル記録し、メモリハイコーダー（HIOKI，型式8850）を用いて解析した。また、流れの状況をビデオ撮影することによって流れの速度を実験後読みとった。実験では、水と雪の割合、雪泥の重量、斜面角度などの条件を変化させて行った。

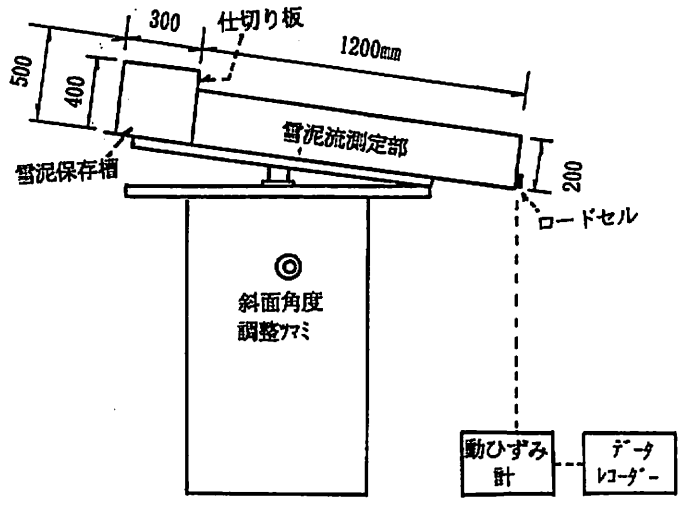


図-1 雪泥流の衝撃力測定実験装置

IV 実験結果

実験は総数で40回程度実施した。そのうち、予備実験を除いた実験結果の一覧表を表-1に示す。これは、各実験ごとの斜面角度、雪泥の重量などの実験条件と流下速度、衝撃力などの解析結果を示したものである。

雪の割合を多くし、雪と水の重量比 (W/S) を3以下にした場合は、水だけが流下し、雪が斜面上部に残る現象が見られた。

表-1 実験結果一覧表

実験No.	斜面角度 (度)	重量		重量比		流下速度 m/s	衝撃力		備考
		水 (kg)	雪 (kg)	水/雪	雪/水		最大 gf	平均 gf	
22	10	5.95	0	∞	0	0.78	23	11.8	
23	10	5.21	1.06	4.49	0.22				流下せず
24	10	3.5	1.92	1.82	0.55				流下せず
25	10	4.04	1.5	2.69	0.37				流下せず
26	10	5.54	0.69	8.03	0.12	0.85	40	12.0	
27	10	4.97	0.86	5.78	0.17	0.98	157	12.5	
30	10	5.01	1.08	4.64	0.22	0.83	146	16.0	
31	10	2.99	0.64	4.67	0.21	0.69	135	9.5	
32	10	3.01	0.67	4.49	0.22	0.70	102	9.3	
33	10	2.07	0.42	4.93	0.20	0.67	72	9.2	
34	20	5.01	0.99	5.06	0.20	1.06	140	12.6	
35	20	5.07	0	∞	0	1.03	17	9.2	
36	30	5	1.03	4.85	0.21	1.16	84	15.7	
37	30	4.99	0	∞	0	1.18	28	16.4	

(1) 流下速度

図-2は斜面角度による流下速度の変化を示したものである。これから、斜面角度が大きくなれば流下速度も大きくなるが、雪泥流(W/S=5の場合)と水の流れとの差は無いことが確認された。

一般に、流体が物体に衝突した場合の衝撃力は(1)式であらわされる。kは無次元の定数で、流体が非圧縮性と仮定

できれば $k = 1/2$ である。また運動量保存のみ考えれば $k = 1$ となる。したがって、水の密度は $1,000\text{kg/m}^3$ で本実験での雪泥の密度は 950kg/m^3 であるから、どちらも速度が同じ場合には水の方が衝撃力は大きいことが予測された。

$$P = k \rho v^2 \dots\dots\dots(1)$$

P : 衝撃力 (gf/cm²)

ρ : 流体の密度 (g/cm³)

v : 流下速度 (cm/s)

k : 係数

(2) 雪泥流の衝撃力

図-3には斜面角度が10度の時の水と雪泥(W/S=4.55, 総重量が6kg)の衝撃力の結果が示されている。明らかに水の方が衝撃力が小さく、さらに雪泥の衝撃力には瞬間的にいくつかの大きな力がパルス状に現れている。これはロードセルの受圧面積よりも大きな雪泥の凝集構造が衝突したためと考えられる。雪泥は凝集性という構造を持っているのでその構造のスケールが衝突を受ける物体のスケールよりも大きいと雪泥の方が水よりも衝撃力が大きい結果となった。

図-4は、雪の水に対する重量比と(水だけの場合が0となる)衝撃力の関係を示したものである。ここに示す最大衝撃力とは衝撃力のピーク値であり、平均衝撃力は、流れがロードセルに衝突している間の衝撃力の平均

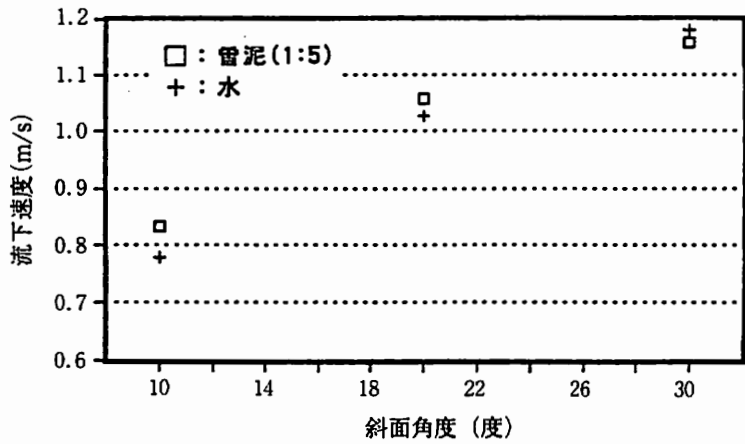


図-2 斜面角度と流下速度の関係

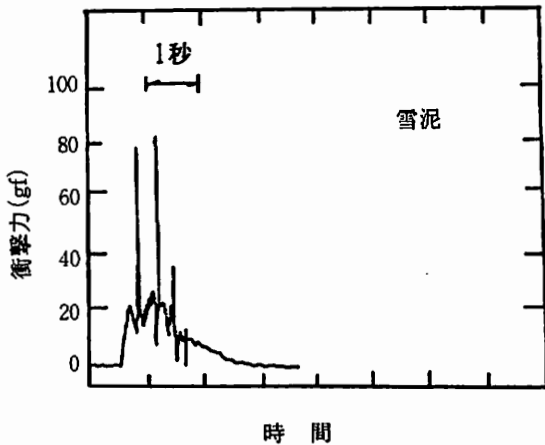
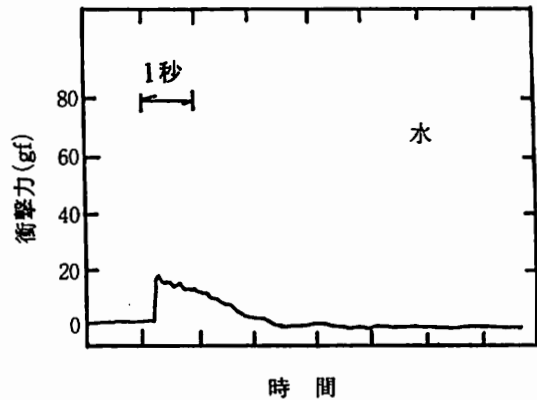


図-3 水流と雪泥流の衝撃力の比較
上図：水流, 下図：雪泥流

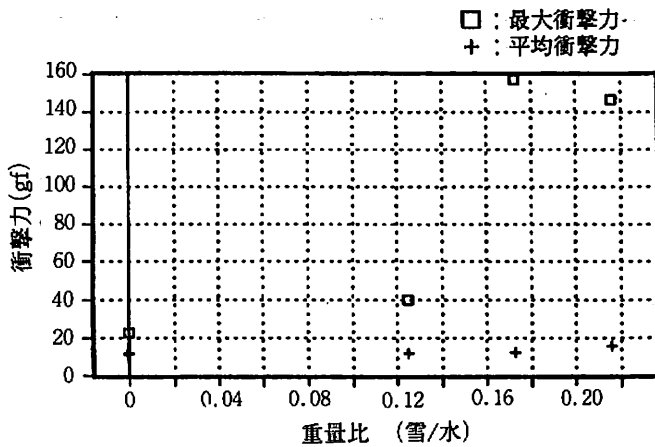


図-4 雪水の重量比 (雪/水) と衝撃力の関係
横軸の0は水の場合

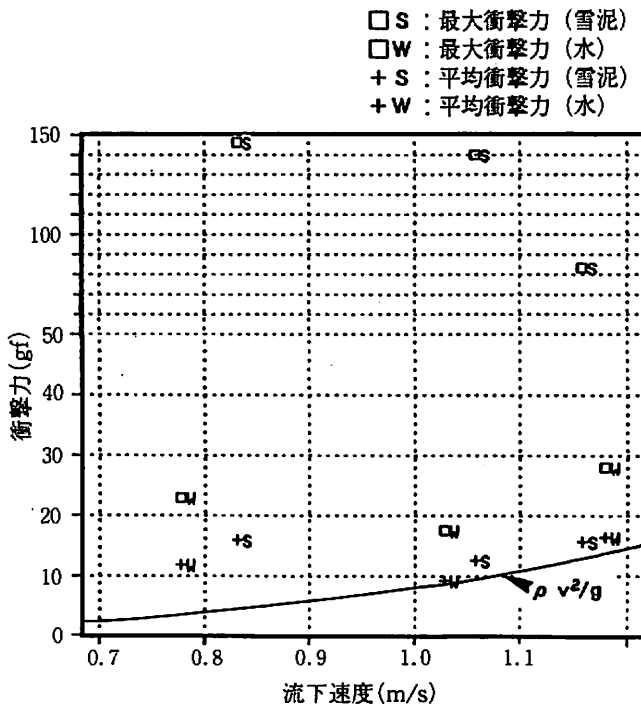


図-5 流下速度と衝撃力の関係

値を求めたものである。水だけの場合、衝撃力の変化が少ないので衝撃力の最大値と平均値の差は小さいが、雪の量が大きくなるほど最大値は急増した。図-5に最大衝撃力と流速の関係を示した。平均衝撃力に対して(1)式に示す係数kは1~2であるが、雪泥流の最大衝撃力に対してのkは10以上にもなった。

また、図-6は、雪泥流の全体量と衝撃力を示したもので、全体量が多いほど、平均衝撃力ならびに最大衝撃力も大きくなる傾向が見られた。この傾向は実際の雪崩でも発生量が多いと雪崩の流動性が良いことと対応するものであろう (和泉;1985)。

(3) 衝撃力のスペクトル解析

雪泥流の衝撃特性を把握するために、衝撃力データのスペクトル解析を試みた。図-7は水だけと雪泥流の解析結果である。水だけの場合に比較し、雪泥流では特に10Hz以上の周期の波形が卓越している傾向がみられた。これは、雪泥流のなかの凝集構造がロードセルに衝突しては破壊するという過程を表しているものと推定される。

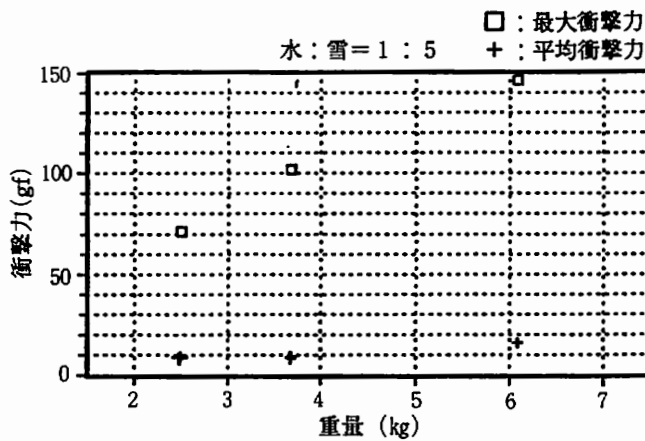


図-6 重量(水+雪)と衝撃力の関係

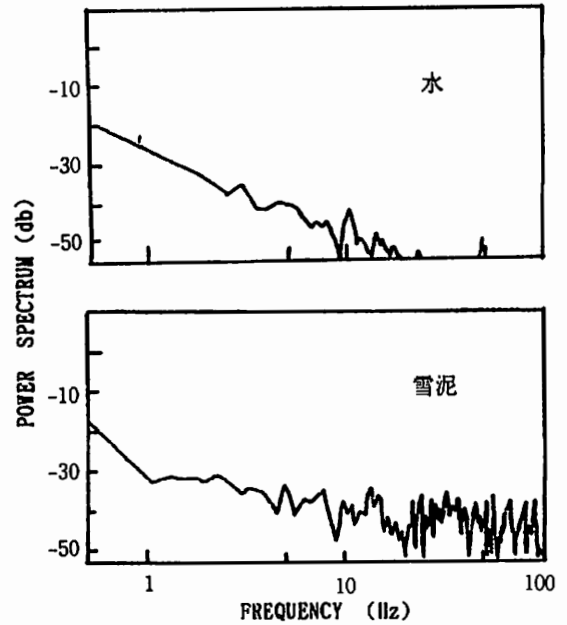


図-7 衝撃力のスペクトル解析

V ま と め

本研究では、最近注目されている雪泥流の衝撃力を測定した。その結果、雪泥流の衝撃力を評価する際には雪泥の凝縮性のために、人体や橋桁のような小さな構造物に対しては水よりも大きな力を予想しなければならない。そして雪泥の凝集構造よりも大きな構造物に対しては水が衝突するとして強度計算してもさしつかえないと結論できる。今後は実験室で得られた結果を参考にして、自然界の雪泥の物性や発生機構を明らかにして、災害対策技術の発展に貢献したい。

最後に、この研究は平成4年度と5年度の文部省科学研究費補助金(一般研究B、代表：小林俊一)と(財)セコム科学技術振興財団の援助を受けて行われたことを記して感謝する。

参 考 文 献

- 安間 荘(1993)：富士山におけるスラッシュ雪崩発生の初期条件と流れの動態。雪氷，55-2，142-144。
- 川田邦夫・広川強士(1993)：黒部峡谷の融雪鉄砲水災害。雪氷，55-2，147。
- 小林俊一・和泉 薫・長沢 武・丸山雅隆・上石 勲(1993)：1990年2月11日の長野県栲池スキー場における雪泥流災害について。新潟大学災害研年報，15，47-53。
- Kobayashi, S., K. IZUMI, Y. Ezaki and M. Tan (1992)：Mechanical properties of high water content snow. Second International Conference on Snow Engineering, Santa Barbara, 1992, CRREL Special Report 92-27, 313-321。
- Kobayashi, S. and K. Izumi (1989)：Viscosity of slush. First International Conference on Snow Engineering Santa Barbara, 1989, CRREL Special Report 89-6, 346-353。
- 小出 嵩(1981)：東頸城郡牧村に発生した鉄砲水。56豪雪の記録，土木学会新潟会，96-102。
- 鈴木幸治・藤田至則(1983)：地すべり実験装置。新潟大学災害研年報，5，127-132。