

Lecture

すべりに伴う物質の移動と変形 第3回

Displacement and deformation of the sliding materials No.3

雪崩

Snow avalanches

納口恭明／独立行政法人 防災科学技術研究所

Yasuaki NOHGUCHI／National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

キーワード：雪崩，雪

Key words：snow avalanche, snow

1. 「雪崩」とは？

雪崩は、科学的には「いったん斜面上に積もった雪が重力の作用で、肉眼で識別できる速さで移動する自然現象」と定義される。材料は雪だけという点で、一見単純そうである。しかし、地球上の積雪は融点近傍にあり、降り積もったあとも、時間の経過とともに、その間の気象環境に依存し、物性は大きく変わる。たとえば密度は、降り積もったばかりの新雪では $100\text{kg}/\text{m}^3$ 以下で、まさに綿菓子のようにであったものが、圧密や融解凍結を経ると融雪期にはまるで岩盤のように強固になる。また、多量に水を含んでシャーベット状になることもある。究極的には氷河の氷も、積雪の一種である。

したがって、斜面積雪の物性の違いにより、発生・すべり・移動・変形も大きくその様相を変える。ある場合は、山体崩壊にともなう岩屑流や火山における火砕流のように煙を巻き上げて流れるものや、地すべりのように地面をゆっくりと這うように移動し徐々に移動速度を増して肉眼で識別できる速さで動き出すもの、土石流や泥流のように完全に水で飽和した泥状になるもの、落石のように比較的大きく、強固なままのブロック状で回転・跳躍を伴うものなど、すべて雪崩と呼ばれる。また発生量にして 1m^3 以下のものから 10^7m^3 のものまで、移動距離にして数mから10km以上のものまでである。

このため、それぞれに応じて、発生・運動を支配する物理はまったく異なることになる。ここでは、材料が H_2O ということで一見単純に見える雪崩現象の発生・運動の多様性を紹介する。

2. 雪崩の基本的な分類

積雪はそれをつくりだすそれまでの降雪や気象履歴に対応した層構造を形成し、雪崩は積雪の底面を含めた積雪層のどこかがせん断破壊されて発生する。このとき、発生領域が面的な広がりを持って動き出すか、一点から楔状に動き出すかによって、面発生と点発生に区分される（写真－1）。また、積雪層の破断面が底面か積雪層内部かによって、全層と表層に区別される。さらに発生域において動き始める積雪に液体としての水分が含まれ



写真－1 点発生湿雪表層雪崩

表－1 日本雪氷学会による雪崩の分類¹⁾

1	面発生	乾雪	表層	雪崩
2	面発生	乾雪	全層	雪崩
3	面発生	湿雪	表層	雪崩
4	面発生	湿雪	全層	雪崩
5	点発生	乾雪	表層	雪崩
6	点発生	乾雪	全層	雪崩
7	点発生	湿雪	表層	雪崩
8	点発生	湿雪	全層	雪崩

るか否かによって、湿雪と乾雪に区分される。これらの組み合わせで、表-1のように発生に関して8通りの雪崩に分類される¹⁾。

これらに属さない特殊な雪崩として、多量の水を含むことで、積雪が水に飽和された状態で移動を始める「スラッシュ雪崩」、氷河が崩れて流れ落ちる「氷河雪崩（あるいは氷雪崩）」、雪渓などの雪塊がブロック状に落下する「ブロック雪崩」、人工斜面上の「法面雪崩」、屋根雪による「屋根雪崩」がある¹⁾。

運動に関しては雪煙を上げず、流れるように移動する「流れ型雪崩」、空中に舞い上がる雪煙自体を雪崩本体として運動する「煙型雪崩」、その中間で、下層に流れ型、上層に煙型となる「混合型雪崩」がある。湿雪雪崩はほとんど流れ型となり、氷点下の乾雪雪崩は雪煙を伴う形態をとる。

雪崩発生後に堆積域の雪を調べると、しばしば丸みを帯び、比較的粒径のそろった雪玉からなる巨大集団を目にすることがある(写真-2)。自然積雪が、雪崩となって激しい運動の後、このような雪玉となったのである。水分を含まない乾雪雪崩では粒子間の付着性は少なく、粉砕作用によりより細かな雪塊に分裂し、ときには氷粒子を最小単位とするような微小粒子からなる雪煙になることにより雪崩としての流動性が生まれる。これに対し



写真-2 湿雪の雪崩で形成された雪玉



写真-3 バケツを揺り動かして自然にできた雪玉

て、水分を含む湿雪雪崩では、水分をバインダーとして大きな雪玉に転道造粒されることにより、流動性をもつ雪崩へと成長する。これは、ご飯粒には流動性はないが、おむすびにすると流動性が生まれて転がりだすようなものである。その意味で雪崩は、自然に起こる雪の重力輸送であり、雪質に応じて自発的に最も流動に適した形態に高速造粒されたものとみなすことができる。逆にいうと、そのようなものだけが十分に発達した雪崩になりうると考えることができる。

雪崩の内部で起こる造粒現象を手軽に再現することができる。バケツの中に雪を入れ、回転、及び前後運動をすれば密度、温度、粒径など雪質に応じて付着造粒されて雪玉になる場合や、粉砕されてバラバラの氷粒子になる場合がわかる(写真-3)。

3. 煙を巻き上げる雪崩

降雪中、あるいは降雪直後に発生する大規模な面発生乾雪表層雪崩は雪煙を巻き上げる煙型か混合型になる場合が多く、岩屑流や火砕流と同様、雪煙は浮遊する固体としての微小雪粒子と空気が一体となった固気混相流である。密度は空気の10倍程度の 10kg/m^3 である²⁾。

2000年3月27日に発生し、2名の犠牲者を出した岐阜県上宝村左俣谷の雪崩は、典型的な面発生乾雪表層雪崩で、発生量 166万m^3 、流下距離 4.6km 、推定速度 50m/s で、日本で記録された雪崩としては発生量、流下距離とも最大規模ある³⁾。

一般に表層雪崩は積雪内の弱い層(弱層)の強度をその上に積もった積雪荷重による駆動力が勝った場合に弱層が破壊して表層雪崩になる。降り続く降雪による駆動力の増加が引き起こすような自然発生の場合と、微妙に釣り合っているところにスキーヤーが入り込むことによって引き起こされる誘発の場合、人工雪崩のように人為的な爆発によって引き起こされる場合がある(写真-4、写真-5)。



写真-4 面発生乾雪表層雪崩発生前の斜面



写真－5 人工的に起こした面発生乾雪表層雪崩発生後の斜面



写真－6 面発生湿雪全層雪崩

4. 雪の地すべり，グライドと全層雪崩

雪崩になる前の斜面積雪でも底面では静的なすべりを起こしておりグライドと呼ばれている。地面と積雪底面の温度が0℃で凍結していない限り，斜面積雪は安定な場合で1日に数cm程度の速さでゆっくりと下方へ移動している。この現象は肉眼では識別できないので雪崩ではない。

グライド現象を実際に長期に測定してみると移動速度は必ずしも常に一定ではなく，減速・加速・静止などが見られる。とくに全層雪崩の発生直前には必ずグライドの加速が観測され，その極限として全層雪崩(写真－6)へと連続的に移行する。その意味で，前兆現象を伴う地すべりに近い。

5. 雪の泥流，スラッシュ雪崩

積雪が多量の水を含み，雪泥（スラッシュ）と呼ばれる雪が水で飽和した状態で流下するスラッシュ雪崩は不透水層上の積雪が融雪や降雨によって多量の水を含むことで発生するもので，氷河地帯や永久凍土地帯で見られる⁴⁾。スラッシュ雪崩は固体としての雪と液体としての水が一体となって流れる固液混相流である。日本では，富士山に発生する雪代（ゆきしろ）と呼ばれる現象がこれに当たり，冬期に土壌が凍結して不透水層を形成する森林限界より上では，融雪や降雨などにより，スラッシュ雪崩が発生する。春先の鉄砲水として知られ，雪でせき止められた河川が雪を一気に押し流しながら流れ下る現象も移動形態はスラッシュ雪崩と同じものであり，雪泥流と呼ばれている。

スラッシュ雪崩は土石流・泥流と運動形態は類似している。時には運動中に土砂を巻き込み，実際に土石流化することもある。固体部分が氷なので水に浮くため流動性はよく他の雪崩と比べてかなりの緩斜面でも流れる。

6. 雪の落石，ブロック雪崩

ほとんどの積雪が解けた後にも沢筋などに局所的に残されたかなり高密度の積雪がブロック状のまま崩れて落ちてくる現象も雪崩として定義される。これはブロック雪崩と呼ばれるもので，回転や跳躍を伴って落下し，災害をもたらすこともあり，その挙動は「落石」と類似している。

2000年6月18日新潟県浅草岳で発生したブロック雪崩では急斜面上の雪渓から総量にして約20トンの雪が大小さまざまなブロック状の雪塊として落下し，遭難者の救助を行っていた捜索隊員に襲い掛かり，9人の死傷者を出した。

7. 日本にない氷（河）雪崩

氷河もまたいったん積もった積雪の一形態である。したがって氷河が崩壊して流れ下る現象も，雪崩の一種であり，氷雪崩あるいは氷河雪崩（ice avalanche）と呼ばれる。とくに懸垂氷河と呼ばれる急峻な山腹に垂れ下がるように張りついている氷河は，上流からの氷の流入とバランスするように崖下へと末端の氷が押し出され，準周期的に崩落することでその形が定常的に保たれる。したがって，上流からの氷の流入がある限り，氷河雪崩は起こり続けることになる。その意味では和風の庭につきものの竹筒に水が流れ込み，水が一定量を超えると竹筒が傾いて水を排出する「しし脅し」と同じ種類の振動現象である。

氷河のない日本では氷河雪崩は起こらないが，1997年8月にカラコルム山脈スキブルム峰で発生し，下山途中の「神奈川ヒマラヤ登山隊1997」の日本人6名が犠牲になった雪崩はまさに氷塊の崩落による爆風を伴う氷河雪崩である。



写真-7 30万個のピンポン球雪崩に巻き込まれる直前

氷河雪崩で大規模なものとして、1970年5月31日にペルー沖で発生したマグニチュード7.6の大地震によって引き起こされた南米ペルー、ワスカラン山の氷河雪崩が挙げられる。その発生量 10^7m^3 で、雪崩と定義される現象のうち、確認されているものでは最大規模である。

氷河雪崩は長い移動中にさまざまな形態を取ることがあり、氷塊の落下によって細かく粉碎し爆風を伴う煙型の運動形態になったり、移動中に水をとまってスラッシュ雪崩状になったり、また、土砂を巻き込んで土石流化することもある。

8. 雪崩の形と模擬物質による再現

運動中の雪崩の形態的特長は、先端部分に頭が形成され、後端は尻尾のように細長く伸びる点にある。このようなおたまじゃくし形の形成は雪崩の終端速度 V を速度スケール、斜面長 L を長さスケールとする無次元数（フルード数） V^2/Lg で判断でき、

$$V^2/Lg \ll 1 \dots\dots\dots(1)$$

のとき、すなわち、終端速度に応じて斜面が十分に長ければ、頭と尻尾が形成される⁵⁾。これは、終端速度は雪崩が大きくなればなるほど大きくなることと関係してお

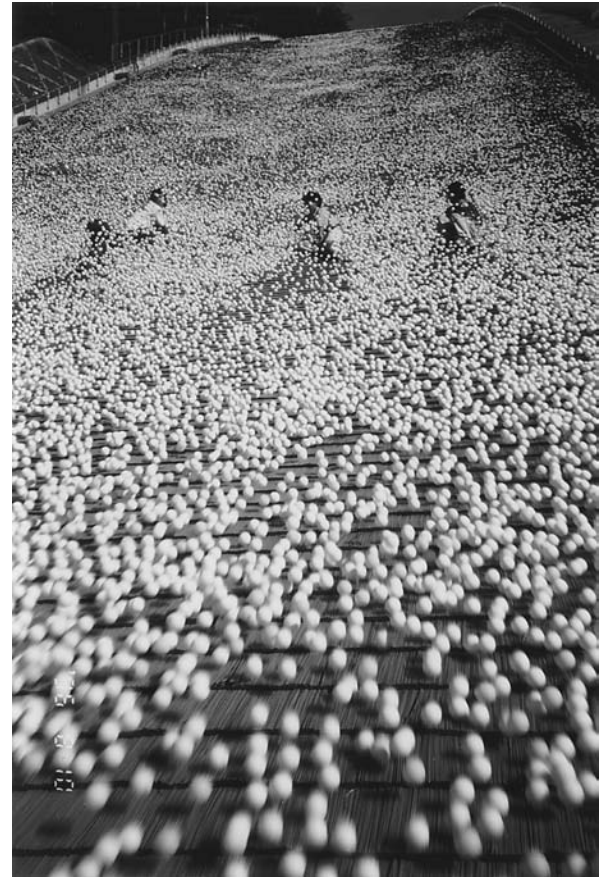


写真-8 ピンポン球雪崩に巻き込まれた直後。1名が流されてしまった

り、直径2mm程度の発泡スチロール粒子やガラスビーズ粒子、ピンポン球、ゴルフボールを使った実験で確かめられている（写真-7、写真-8）。

軽い新雪を模擬した発砲スチロールやピンポン球を用いた実験から終端速度は雪崩の規模をあらわす粒子数の6分の1乗に比例して増加することが確認されている。空から舞い落ちるひとひらの雪片のように、たった1個では怖がる必要のないピンポン球も東京ドームいっぱいでは新幹線の速度に匹敵する雪崩となり、十分危険な存在となる。

引用文献・参考文献

- 1) 日本雪氷学会 (1998)：日本雪氷学会雪崩分類，雪氷，60，pp.437-444.
- 2) Mclang, D. and Schaerer, P.(1993)：The Avalanche Handbook, The Mountaineers/Seattle, 271p.
- 3) 日本雪氷学会 (2001)：日本最大の雪崩はいかにして起こったか，3.27左保谷雪崩災害調査報告書，68p.
- 4) 小林俊一，和泉薫 (1998)：雪泥流，気象研究ノート，190，pp.83-90.
- 5) 納口恭明，西村浩一 (1998)：模擬雪崩の相似について，気象研究ノート，190，pp.103-112.
(原稿受付2004年7月8日，原稿受理2004年8月30日)