雪崩の発生機構の教材開発－弱層モデルと摩擦モデル－
A study on teaching materials of avalanche release mechanism – Weak layer model and friction model –

堀尾沙希（北海道教育大学札幌校*），尾関俊浩（北海道教育大学札幌校）
秋田谷英次（NPO 法人雪氷ネットワーク）
Saki Horio, Toshihiro Ozeki, Eizi Akitaya

1. はじめに

2017 年 3 月 27 日栃木県那須岳で表層雪崩によって春山安全講習会に参加した高校生ら 8 名が亡くなる雪崩事故が発生した．この事故はスキー場のバックカントリーと呼ばれる場所で起こっているが，バックカントリー遭難による死亡事故の実に 43%は雪崩が原因となっている．那須の雪崩事故の原因は表層雪崩であったが，表層雪崩は発生の前兆現象がないため発生を予期しづらく特に注意が必要な雪崩である．我々は今後このような事故が繰り返されないためにはユース雪崩教育が必要であると感じ，教材開発に取り組むこととした．

現在の中等教育課程（中学校と高等学校）では積雪や雪崩に関する学習は行われておらず，雪に関する学習も中学校 2 年生理科の「空気中の水の変化」の単元で雪の結晶のでき方，「大気の動きと日本の四季」の単元で冬の天気を学習するにとどまっている．つまり，中高生は雪崩がどのような現象であるのかをイメージすることすら難しい現状にある．以上の背景を踏まえて，本研究では摩擦モデルと弱層モデルの学習用実験装置を作成し，各モデルで上載積雪が増えたときに雪崩が発生するか否か検証した．

2. なぜ摩擦説では表層雪崩を説明できないのか

2.1. 中等教育の学習内容から表層雪崩の発生を考える

報道機関などでよく耳にする雪崩の発生機構の一般的な説明は，「摩擦説」と「弱層破壊説」の 2 つである．このうち「摩擦」は中等教育で学習する．一方，破壊の科学は中高生には新しい概念である．

摩擦説とは斜面上に積もった雪が気象の影響で凍るなどして氷化し，摩擦が小さくなり，その上に雪がたくさん積もると滑りやすいので，雪崩が発生するという考え方である．しかしこの説では理論上説明がつかない部分が出てくる．例えば，図 1 のように斜面上に質量 m の物体（積雪）があった場合，物体には鉛直下向きに mg の重力が働く．この力を分解すると，斜面平行下向きに $mg\sin\theta$，斜面垂直方向下向きに $mg\cos\theta$ の力がかかっている．また，斜面垂直方向上向きに垂直抗力 N，斜面平行上向きに摩擦力 F が働いている．この物質は斜面上に静止しているためこれらの力がつり合い，$N=mg\cos\theta$，$F=mg\sin\theta$ と表される．ここで，この物質が斜面上を滑り出すのは $mg\sin\theta$ が $F_{max}=\mu N=mg\cos\theta$（$\mu$:静止摩擦係数）を超えるときであるから，

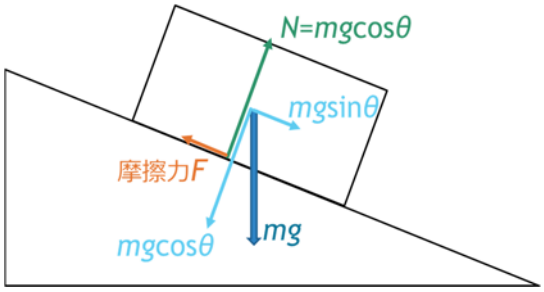

図 1 高等学校で学習する斜面上の物体にかかる重力と摩擦力の概念．

*現在　札幌市

Copyright © 2018 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部

$$mg\sin\theta > \mu mg\cos\theta \quad (1)$$

となり，

$$\mu < \tan\theta \quad (2)$$

という式が導かれる．(2)式によると雪崩の発生は質量 m には関係せず，θ と μ の変化によってのみ決まる．つまり，もともと雪が積もっている斜面ならば，上載積雪が増えてもその分摩擦力 F も大きくなるため，μ または θ が変わらない限り上載積雪は滑らないということを表している．したがって，中高生が中学 3 年生の「仕事とエネルギー」や高等学校物理基礎の「斜面上での物体の運動」で学習した「摩擦」の知識を基に今回のような表層雪崩の発生機構を考えてもうまく説明できず，行き詰ってしまうことになる．そこで，中高生には新しい概念である弱層の破壊の理論を導入する．

2.2. せん断破壊を用いた弱層破壊説

積雪内部に滑り面となる薄い弱層（せん断強度の弱い層）がサンドイッチのように挟まった構造の斜面がある．弱層破壊説とは，弱層の上に積もった上載積雪が雪の重さにより落ちようとする力（駆動力）と弱層が上載積雪を支える力（抵抗力）が釣り合っているときには積雪は斜面上で動かないが，さらに雪が積もったり斜面上に人が侵入したりなどして駆動力の大きさが抵抗力の大きさよりも大きくなったとき雪崩が発生するという考え方である．表層雪崩の発生機構は雪氷学ではこの弱層破壊説で説明される．

弱層が上載積雪を支える力（抵抗力）はクーロンの式 $\tau=C+\sigma\tan\varphi$（τ:せん断破壊強度，C:粘着力，σ:垂直応力，φ:内部摩擦角）で表される．積雪において粘着力 C と内部摩擦角 φ の値は雪質や密度，含水率などによって異なる．積雪の特徴として粘着力 C が比較的大きいため，クーロンの式では第 2 項よりも第 1 項が大きく影響する．上石ら[1)]によるとぬれざらめ雪の粘着力と内部摩擦角を測定した結果，C=4290〔Pa〕，$\tan\varphi$=0.539 が得られた．この結果からも積雪の粘着力 C は大きく，クーロンの式の第 1 項の影響が大きいことが分かる．

本研究ではグラニュー糖や磁石，マジックテープなどの物質を用いてせん断強度を測定し，積雪と同じように第 2 項の感度が悪く，第 1 項，つまり粘着力 C の値が優先する材料を探し，弱層モデルとして使用することを目指した．

3. 実験装置

3.1. 摩擦モデル

摩擦モデルでは斜面が氷化することで，積雪と斜面の間の摩擦が小さくなり積雪が積もることなく滑落する様子を再現し，実際の雪崩とは異なる現象であることが理解できるよう工夫した．また，積もることなく滑落する様子をよりイメージしやすくするために，滑落する角度を測定し，視覚的に分かりやすいようにした．滑り面の材質は紙よりも氷化をイメージしやすいと考え，アクリル板を採用し，積雪表面が滑りやすいことを直感的に示す工夫をした（図 2）．実際にせん断強度の測定を行った結果，粘着力 C が 0 であったことから質量を増やしていっても落ちる時の角度が変わらないことが予想された．

図 2 摩擦モデルの概観．土台寸法 55mm ×400mm．角度可変．

Copyright © 2018 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部

3.2. 弱層モデルの材料の検討

弱層モデルでは駆動力が抵抗力を上回り滑落する様子を再現した．積雪のせん断破壊はクーロンの式（$\tau=C+\tan\varphi$）の第 1 項の影響が大きく第 2 項の影響が小さいという特徴がある．そこで弱層モデルを作成するための予備実験として，各材料のせん断強度の測定を行い，積雪の破壊を説明するのに適した材料を研究した．

表 1　弱層モデル用の試験材料と組み合わせ．

試験材料		上載側	土台側
グラニュー糖		両面テープ	グラニュー糖
マジックテープ		布	フック面
磁石	弱×強	磁石（弱）	磁石（強）
	強×弱	磁石（強）	磁石（弱）
	強×強	磁石（強）	磁石（強）
	強×鉄	磁石（強）	鉄板
	鉄×強	鉄板	磁石（強）

試験は作成する実験装置の寸法に合わせ，縦 30 cm，横 2 cm の木の土台に試験材料を前面に貼り付け，平地に固定した（土台側）．その上に土台と同じ大きさの木を載せ，上載荷重を 50 g ずつ加えて最大 200 g まで加重し，プッシュプルゲージで引っ張り，せん断される力を 5 回ずつ測定した．試験材料にはグラニュー糖，マジックテープ，磁石の 3 種類を選んだ．また，上に載せる木にも土台に貼り付けた材料と対応する材料を貼り付けた（上載側）．

グラニュー糖の測定では土台側に両面テープで満遍なくグラニュー糖を貼り付け，上載側には小さく切った両面テープを使用した．マジックテープの測定では土台側にマジックテープのフック面を貼り付け，上載側には接着力を下げるために布を使用した．磁石の測定では磁力の強いもの（磁束密度 37.7 mT）と弱いもの（磁束密度 23.3 mT）の 2 種類のシート状磁石および鉄板を用いて，表 1 のように組み合わせて測定を行った．土台側には全面に材料を貼り，上載側には部分的に材料を貼って使用した．

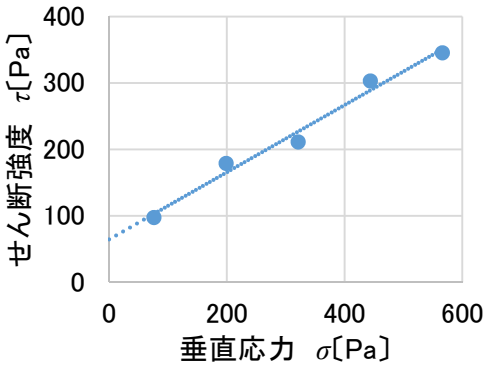

図 3　グラニュー糖の σ と τ の関係．

3.3. 弱層モデルの材料の評価

土台の上に載せた木とおもりの重さを断面積で除して垂直応力 σ としてグラフの横軸にとり，プッシュプルゲージで測定したせん断力を土台の断面積で除してせん断強度 τ として縦軸にとった．このグラフより回帰式を求め，切片から粘着力 C，グラフの傾きから内部摩擦角 φ を求めた．

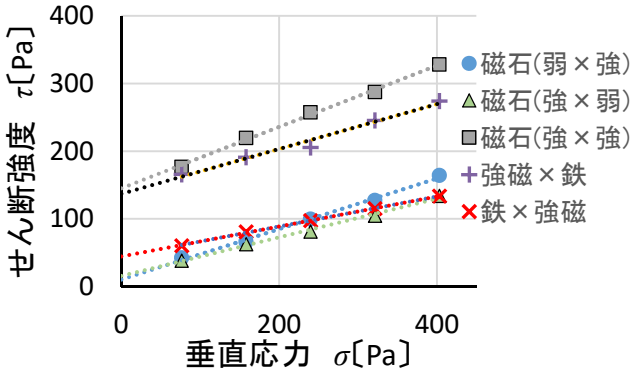

図 4 強磁石，弱磁石，鉄板を組み合わせたときの σ と τ の関係．

マジックテープは形状が表面霜をイメージしやすいので試験材料に選定した．測定結果から回帰式を求め，

$$y=0.64x \qquad (3)$$

を得た．マジックテープの粘着力はほぼ 0 であったことから，イメージの良さに反して本モデルの材料としては適さないという結論を得た．

Copyright © 2018 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部

グラニュー糖について測定結果を横軸に垂直応力 σ，縦軸にせん断強度 τ を取ったグラフを図 3 に示す．回帰式より粘着力 C は 64.7〔Pa〕，内部摩擦 tanφ 値は 0.51 という値が得られた．マジックテープと比べ，粘着力 C の値が大きく内部摩擦角の値も小さいことから，マジックテープよりも弱層モデルに適している．しかし，グラニュー糖を用いた弱層モデルで模型実験を行ったところ，荷重を増やしても上載側が一気に落ちず徐々に下にずり落ちていった．そのため一気になだれ落ちる様子が再現できず，今回の弱層モデルでは使用しないこととした．

磁石について，組み合わせを変えて測定した結果を図 4 に示す．横軸は垂直応力 σ，縦軸はせん断強度 τ である．それぞれの回帰式から求めた粘着力 C と tanφ の値を表 2 に示す．この測定結果から，粘着力 C が大きいものは強磁×鉄板と強磁×強磁の 2 種類が挙げられた．強磁×鉄板の方が内部摩擦角が小さいため，より弱層モデルに適した材料と考えられたが，強磁×鉄板を用いた弱層モデルで模型実験を行ったところ，粘着力が大きすぎて滑落しなかった．鉄板×強磁では上載側の鉄片の長さを調整することで，おもりの荷重による滑落を再現できることがわかり，弱層モデルとして採用することとした．

表 2 材料の組み合わせと粘着力，内部摩擦角．

上載×土台	粘着力 [Pa]	tanφ
弱×強	10.3	0.37
強×弱	15.7	0.29
強×強	145.2	0.45
強×鉄	137.0	0.33
鉄×強	44.4	0.22

強：強磁石，弱：弱磁石，鉄：鉄板

4. 模型実験の結果

摩擦モデルと弱層モデルでおもりを 1 個，2 個，3 個と変化させたときの滑落角度を測定し，摩擦モデルと弱層モデルでの特徴を比較した．摩擦モデルに 50g のおもりを 1～3 個載せて滑落する角度を測定したところ，摩擦モデルではおもりの数を変えても滑り落ちる角度は変わらず，滑落角度はすべて 15° であった．これは理論と一致する結果であった．

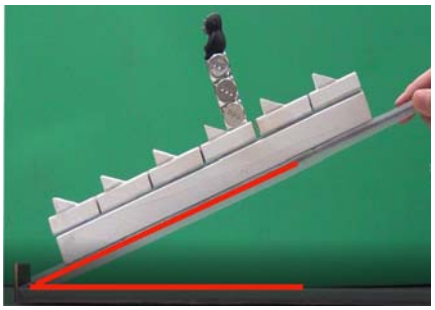

図 5　弱層モデルにおもりを 3 個載せたときの滑落角度．

弱層モデルでは任意の位置（図 5 では下から 4 つ目）に 1 つ 50g のおもりを 1~3 個載せて角度を徐々に大きくしていき，上載積雪が滑落したときの角度を測定した．その結果，おもりが 1 つのときは 33°，2 つのときは 28°，3 つのときは 21° で滑り落ち，おもりが重くなるほど滑り落ちる角度が小さくなることがわかった．上載荷重を大きくするほど滑落する角度は小さくなったことから，上載側が落ちようとする力を弱層が支えきれなくなった瞬間に滑落することを再現できた．

5. おわりに

本研究では，摩擦説という一見正しく思える説がなぜ間違っているのか，弱層というものはどのような概念なのかをモデルを通してわかりやすく説明するよう試みた．弱層モデルの課題として，「弱層」の概念は理解できるものの，実際の弱層がどのようなものかイメージしづらい点が挙げられる．弱層により近い材料によるモデルの検討が必要であると考える．また，上部破断面の再現についても将来の課題であると考える．

【参考・引用文献】

1) 上石勲，町田敬，小田憲一，山口悟，佐藤篤史，2009：雪氷研究大会講演要旨集，P209.

Copyright © 2018 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部