

プレート降雪結晶の弱層のせん断強度変化

八久保 晶弘・秋田谷 英次（北大低温研）

1.はじめに

積雪中の弱層は、表層雪崩の滑り層として注目されている（秋田谷・清水, 1987）。これまでに、弱層の原因となる幾つかの要因について、その形成条件の解明に関する研究がなされてきた（例えば、しもざらめについては Fukuzawa and Akitaya (1993)、表面霜については Hachikubo *et al.* (1995)）。弱層は雪面付近で形成されるケースが多いが、後の降雪で埋没した弱層の時間的な変質についての研究は、これまで殆ど行なわれていない。表層雪崩の発生を気象学的に予知するためには、弱層の形成過程はもちろん、積雪中での弱層の変質過程を知る必要がある。

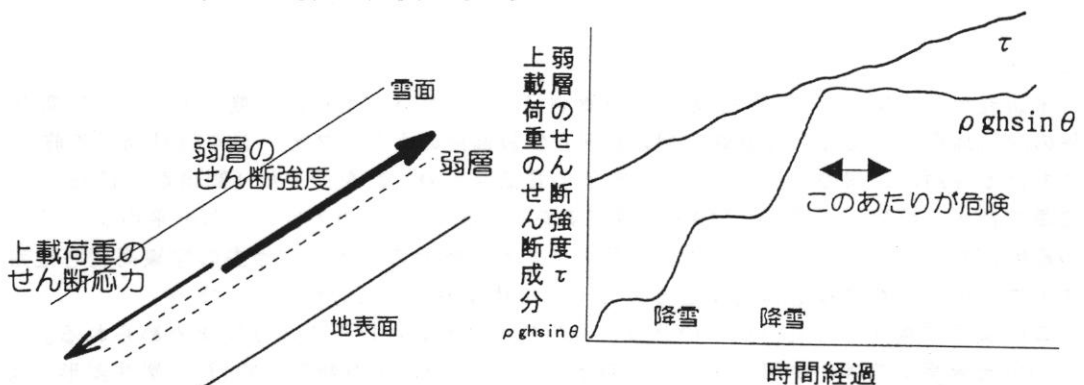


図 1

図 2

表層雪崩発生の危険があるかどうかを議論するとき、弱層のせん断強度と、弱層上の上載荷重による斜面方向のせん断応力との関係をまず考える（図 1）。積雪水量は降雪によって増加するので、上載荷重のせん断応力は時間と共に増加する（図 2）。一方で、弱層は時間が経つにつれ、圧密・焼結によって次第に丈夫になっていくので、弱層のせん断強度も一般に増加する傾向にある（ぬれざらめ・しもざらめは例外であり、ここでは触れない）。よって、弱層が表層雪崩の滑り層として機能するかどうかは、上載荷重によるせん断応力の増加と、弱層のせん断強度の増加の兼ね合いで決まる。前者については降雪量や斜面勾配から求められるが、後者については定量的な議論がほとんどない。本研究では、野外観測において特定の弱層（プレート降雪結晶）を継続的に観察し、そのせん断強度が増加する様子を報告するとともに、簡単な実験を行なうことによって、弱層の温度と上載荷重による圧密の両方が、どれだけ弱層のせん断強度の増加に貢献するかを調べた。

2. 野外観測および実験の詳細

観測は、1995年12月から1996年1月にかけて、北海道北部の北大天塩地方演習林内の雪崩観測所で行なわれた。まず、積雪の断面観測を行ない、形成時期の比較的新しい弱層を選んで、それを1-2週間にわたって追跡した。そして数日おきに13:00に断面観測を行ない、以下の方法によってデータを得た。

せん断有効面積 250cm^2 のシアーフレームと置き針式のばねばかりを用いて弱層の破壊試験を行ない、ばねばかりの値を弱層のせん断強度の指標 SFI (Shear Frame Index) とした (Roch, 1966)。測定は数回ずつ行ない、その中央値を代表値とした。

また、測定期間中、熱電対のセンサ部を弱層中に差し込んだまま、30分間隔で温度を測定した。対象とした弱層は、いずれも雪面から約20cm以上埋もれていて、センサの日射吸収による温度の過大評価はほとんどないと考えた。積雪の圧密が進むなかで、センサは沈み過ぎたり浮き上がったことなく、対象とする弱層によく追従した。

その他、弱層付近の層構造 (積雪粒子の形状・粒径・密度)、弱層上の積雪水量を測定し、弱層付近の積雪試料の薄片製作も行なった。

一方で、弱層のせん断強度の増加に対する温度依存性と上載荷重依存性を調べるために、簡単な実験を行なった。観測期間中に形成されたある弱層について、30cm立方の弱層入りの試料を複数個切り出し、それぞれ観測所の一室 (0°C 以下)、低温室 (-10°C) で数日間保存した。そして、適当日数おきにシアーフレームを用いて破壊試験を行ない、SFI を求めた。また、試料を破壊しないように注意して試料上に重しをのせて、上載荷重による違いも調べた。ただし、保存できる試料の個数に限りがあり、1種類の試料につき複数回の測定はほとんど出来なかった。

3. 結果と考察

観測期間中、雲粒のついていないプレート降雪結晶による弱層が5例観察された。まず、これらの弱層の SFI が増加していく様子を図3に示した。それぞれの弱層の環境 (温度・上載荷重) が異なるにも関わらず、SFI の増加率はおおむね一定の値をとるように見える。このことを詳細に

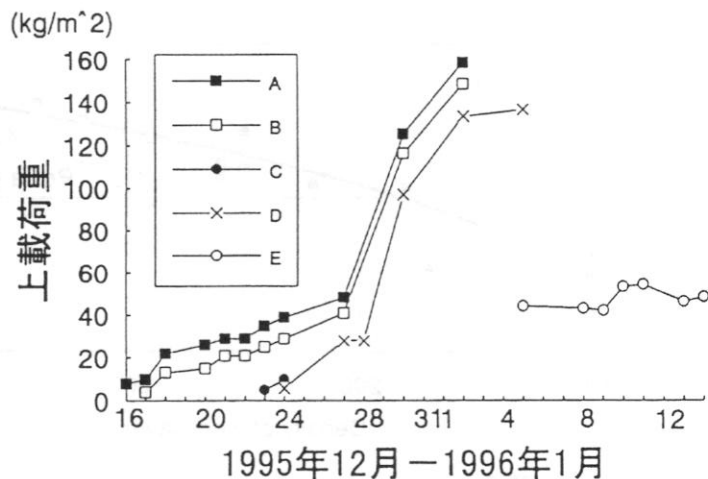


図3

見るために、SFI の増加率と上載荷重との関係を図 4 に、SFI の増加率と温度との関係を図 5 に示した。両グラフから、SFI の増加率の温度依存性と上載荷重依存性は、それぞれ $-1 \sim -4^{\circ}\text{C}$ 、 $10 \sim 150 \text{ kg/m}^2$ の範囲で相関が顕著とは言えない。以上の関係については、後述する室内実験の節で改めて述べることにする。

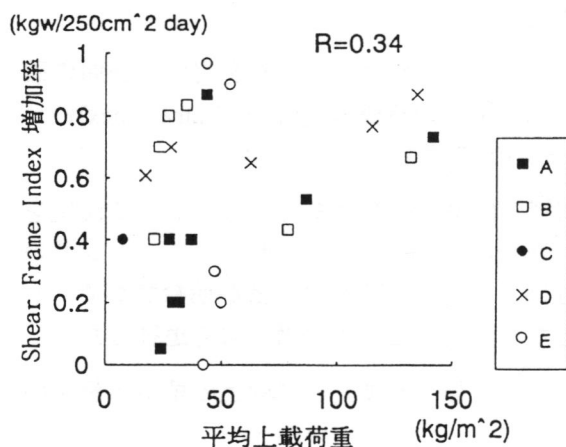


図 4

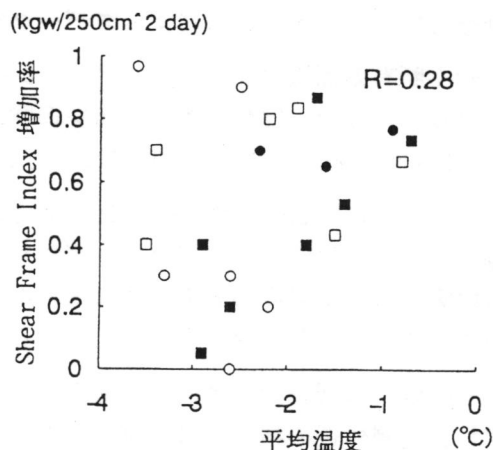


図 5

次に、弱層を含む近傍の積雪密度と SFI (Pa) との関係を図 6 に示した。密度を $\rho(\text{kg/m}^3)$ とすると、Fitting Curve は $\text{SFI} = 0.031\rho^2$ となった。これは、Perla (1977) による、実際に雪崩を引き起こした弱層 72 例のデータから求めた $\text{SFI} = 0.017\rho^2$ と係数が異なるものの、密度の自乗に比例する点で一致した。Perla (1977) によれば、彼の密度データの半数は $25(\text{kg/m}^3)$ の誤差があり、この係数の違いは、SFI の精度の問題に加えて、両者の弱層の密度測定の問題によるものと考えられる。

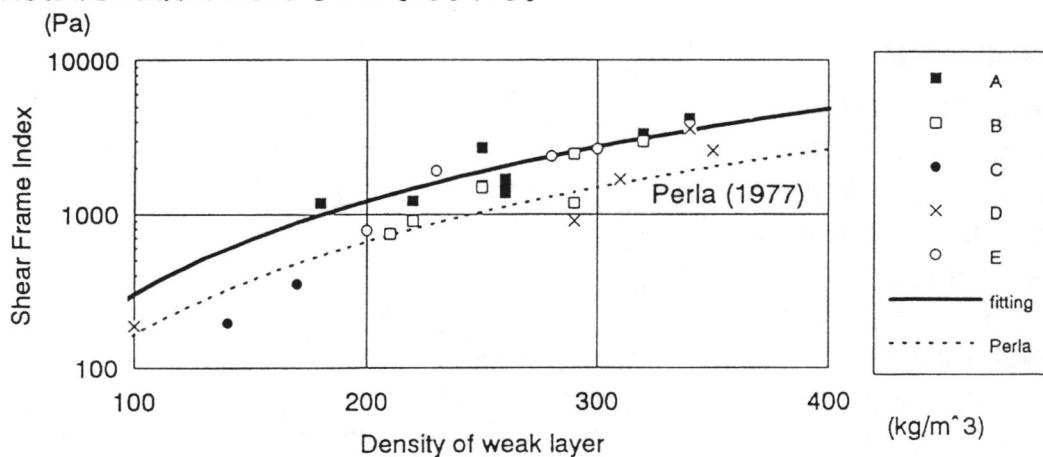


図 6

最後に、実験から得られた弱層の SFI 増加率と上載荷重の関係を、温度をパラメータとして図 7 に示した。データは少ないが、SFI は上載荷重や温度と共に増加する傾向が見られる。SFI の増加率の温度依存性と上載荷重依存性は、野外観測では確認できなかったが、特定の環境下での室内実験からは、両者とも正の関係があることが示唆された。

4. まとめ

プレート降雪結晶による弱層のせん断強度の観測と実験を行なった。その結果、温度の高い方が、あるいは上載荷重の大きい方がせん断強度 (SFI) の増加率が増す、つまり弱層が丈夫になりやすいという傾向が認められた。しかしながら、データはまだ少なく、それぞれの相関は顕著であるとは言えない。今後は、データの蓄積はもちろんのこと、弱層の層厚や結晶形などの他のパラメータの寄与を調べる予定である。

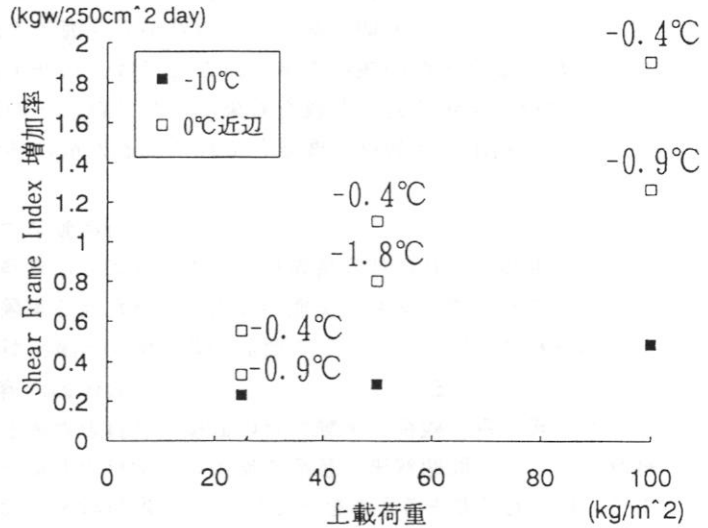


図 7

一方、積雪密度がせん断強度の目安として使えれば、積雪構造の数値モデルから積雪の安定度を容易に推測することができる。弱層付近の積雪密度とせん断強度との関係を求めた結果、Perla (1977) の求めた式と同様の傾向が見られた。ただし、弱層密度の定義にやや難があり、またデータ数が限られるので、信頼性については今後も検討を要する。

5. 参考文献

秋田谷 英次・清水 弘 1987. 積雪内の弱層形成に関する観察事例. 低温科学, 物理篇, 46, 67-75.

Fukuzawa, T. and E. Akitaya 1993. Depth-hoar crystal growth in the surface layer under high temperature gradient. *Annals of Glaciology*, 18, 39-45.

Hachikubo, A., T. Fukuzawa and E. Akitaya 1995. Formation rate of surface hoar crystals under various wind velocities. *Proc. International Snow Science Workshop*, Snowbird, Utah, 132-137.

Perla, R. 1977. Slab avalanche measurements. *Can. Geotech. J.*, 14, 206-213.