新雪剪断強度の時間変化について

松下拓樹，松澤 勝，伊東靖彦，加治屋安彦（(独)土木研究所寒地土木研究所）

１．はじめに

雪崩発生の危険度評価において，勾配 θ の斜面における積雪層の剪断応力 $Q \sin\theta$ と剪断強度 σ の比である積雪の安定度指標 SI（Stability Index）が用いられる場合が多い．

$$SI = \sigma / Q \sin\theta \qquad (1)$$

上載積雪による垂直応力 Q は積雪深や降水量の観測値から計算される．一方，剪断強度 σ は積雪密度との関係式から求められ，新雪やしまり雪について弱層を伴う場合(Jamieson and Johnston, 2001)と伴わない場合(山野井・遠藤, 2002)の以下の関係式がある．

（弱層を伴う場合）　$\sigma = 14.5(\rho/917)^{1.73}$　（２）

（弱層を伴わない場合）　$\sigma = 9.40\times10^{-4}\ \rho^{2.91}$　（３）

式(２)はカナダにおける測定結果，式(３)は主に本州の積雪に基づいて得られたものである．

さて近年，北海道では斜面積雪が雪崩予防柵の柵面をすり抜けて道路に達する現象が問題となっており，この現象は気温が低くかつ降雪強度が大きい時に発生する傾向にあることが指摘されている(松下ら，2008)．そのため低温下多量降雪時の積雪に対して式(２)と式(３)が適用可能かを検証するために札幌近郊の中山峠にて積雪断面観測を行ったところ，積雪層内に弱層は存在しないが測定した剪断強度は式(２)の弱層を伴う場合に近い値となった(松下ら，2007)．この理由を明らかにするため，本論文では剪断強度の時間変化と積雪形成時の降雪強度に着目して，中山峠における測定データの解析を実施し，さらに札幌において降雪強度の大きい気象条件下で形成された新雪の剪断強度測定を行った．

２．測定および解析方法

２．１　中山峠における測定と解析の方法

中山峠における測定内容は松下ら(2007)に詳しいが，以下にその概略を記す．観測は 2007 年 1 月 7 日から 9 日にかけて堆積した約 100cm の積雪を対象に，2007 年 1 月 9 日 18 時から 11

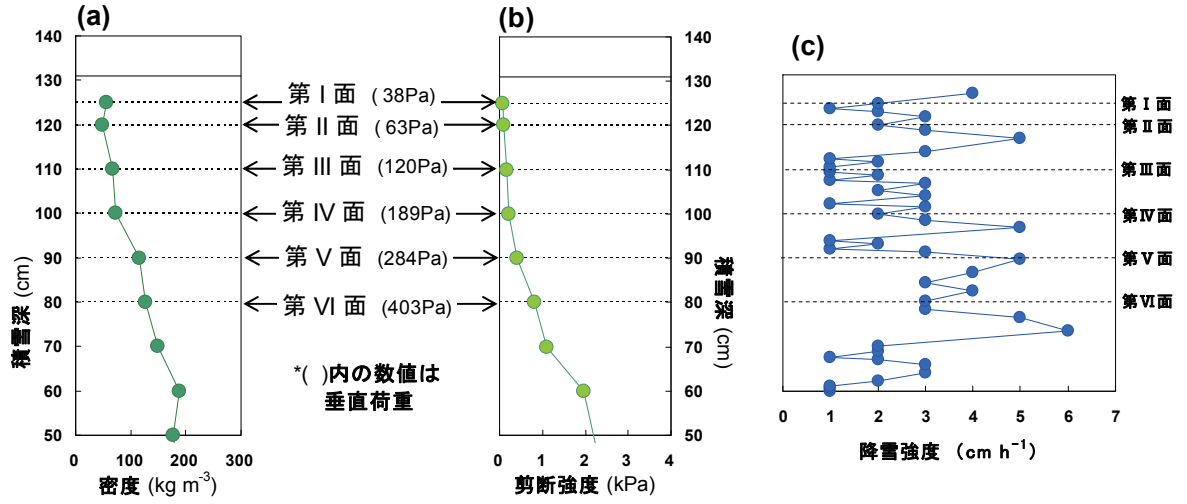

図１　第１回観測で測定した密度(a)と剪断強度(b)の鉛直分布と，１月７日以降に形成された積雪層に対応する降雪強度(c)．降雪強度は隣接する気象観測所の積雪深データより計算．

Copyright © 2008 （社）日本雪氷学会

日 12 時までの期間 3～9 時間毎に合計９回実施した．鉛直方向に 5cm または 10cm 間隔で雪温，剪断強度，密度の測定及び雪質，積雪の粒度，層構造の観察を行った．剪断強度はシアーフレーム(断面積 0.025m^2)を用いて測定し，一つの積雪層に対して２～４回の測定した平均値を解析に用いた．また，各観測毎に新たに積もった新雪層を把握するため，積雪表面にチョークの粉をマーカーとして散布した．図１に第１回観測の密度(図１a)と剪断強度（図１b）の鉛直分布，7 日以降に形成された積雪に対応する降雪強度(図 1c)を示す．図１c の降雪強度は現地に隣接する寒地土木研究所の気象観測施設の積雪深から求めた．

次に第１回から第９回観測における積雪面Ⅰ～Ⅵ(図１)の剪断強度から，その時間変化を調査した．ただし，積雪面Ⅰ～Ⅵの高さは圧密によって時間とともに変化するため，第２～９回で剪断強度を測定した高さは第１回の積雪面Ⅰ～Ⅵの高さに一致していない．そこで図２に示すように，第１回観測の積雪面を基準とした積雪重量は変化しないと仮定して，第２回以降はこの積雪重量が同じである第１回積雪面からの深さを見出し，その深さに最も近い上下の測定値を内挿して剪断強度を求めた．この方法で第２～９回観測における積雪面Ⅰ～Ⅵの剪断強度を推定した．

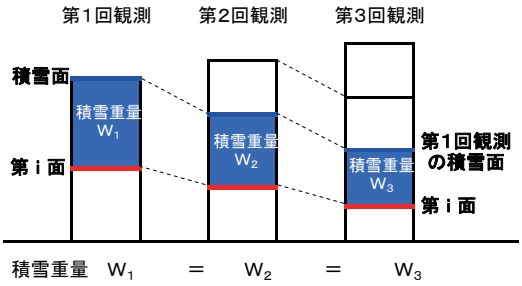

図２　積雪重量を用いた第ｉ面の高さの推定方法

２．２　札幌における測定方法

寒地土木研究所敷地内(以下，札幌)にて，2008 年 2 月 26 日 14 時から 27 日 7 時にかけて積もった新雪を対象に剪断強度と密度の測定を行った(図３a)．対象とした積雪は地上からの高さ 80cm(第１面)と 70cm(第２面)に位置する新雪で，測定は雪が止んでから１日後（2 月 28 日），２日後(2 月 29 日)，５日後(3 月 3 日)の３回実施した．測定に際し 2 月 28 日の積雪面からの上載積雪荷重を指標に対象積雪層を見出して測定を行った．剪断強度はシアーフレーム(断面積 0.025m^2)を用いて測定し，一つの積雪層に対して５回以上の測定結果の平均値とした．また上記２つに加えて高さ 55cm のこしまり雪(第３面)についても測定を行った．これは 2 月 23 日に道央地方で吹雪が発生したときに形成された積雪である．

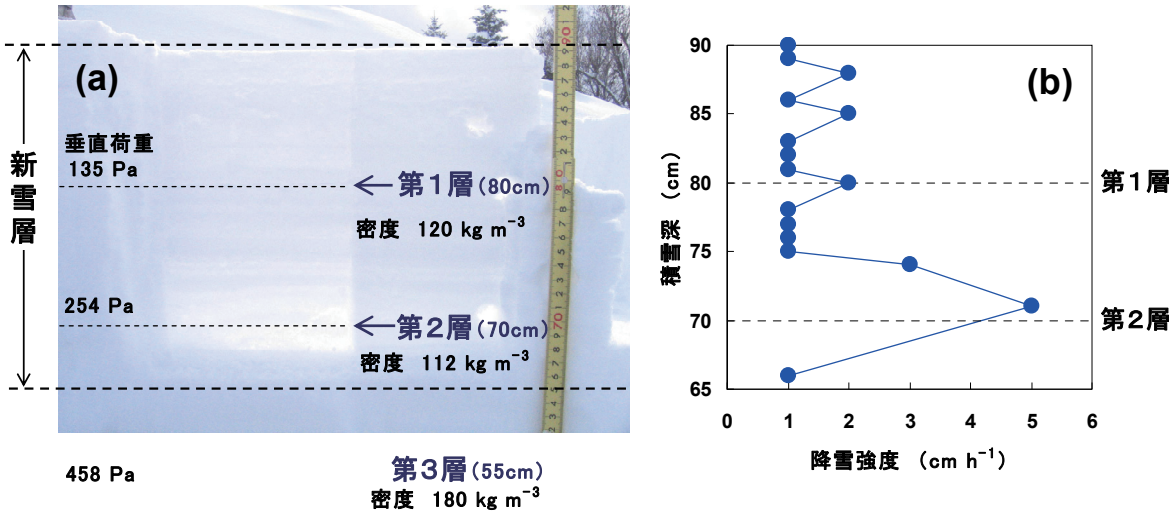

図３　札幌において剪断強度の時間変化を測定した積雪面(a)と積雪形成時の降雪強度(b)
(a)は積雪層を厚さ２cm にして太陽光を背景に撮影．(b)は札幌管区気象台の観測資料より．

Copyright © 2008 （社）日本雪氷学会

図３b に示す降雪強度は，札幌管区気象台における積雪深の観測データから求めたもので，26 日以降に積もった新雪層（高さ 65～90cm）に対応させて示した．第３面に対応する降雪強度の把握は難しいが，この積雪層が積もった 23 日の降雪強度は 1～4cm h^{-1} であった．

３．結果

３．１　中山峠における測定データの解析結果

図４は，中山峠で測定した積雪面Ⅰ～Ⅵの剪断強度と密度の時間変化の推定結果である．積雪面Ⅰ～ⅣとⅤ～Ⅵで時間変化に違いがある．積雪面Ⅰ～Ⅳは弱層を伴わない式（３）に一致した時間変化を示し，積雪面ⅤとⅥは最初は弱層を伴う式（２）に近い値だが時間の経過とともに式（３）に近づく変化を示す．図１c によると，積雪面ⅤとⅥは 5～6cm h^{-1} の大きな降雪強度の下で形成され，積雪面Ⅰ～Ⅳが形成されたときの降雪強度は 1～3cm h^{-1} であった．なお積雪面Ⅴの雪温は-6.8～-7.9℃，積雪面Ⅵは-5.9～-7.1℃であった．

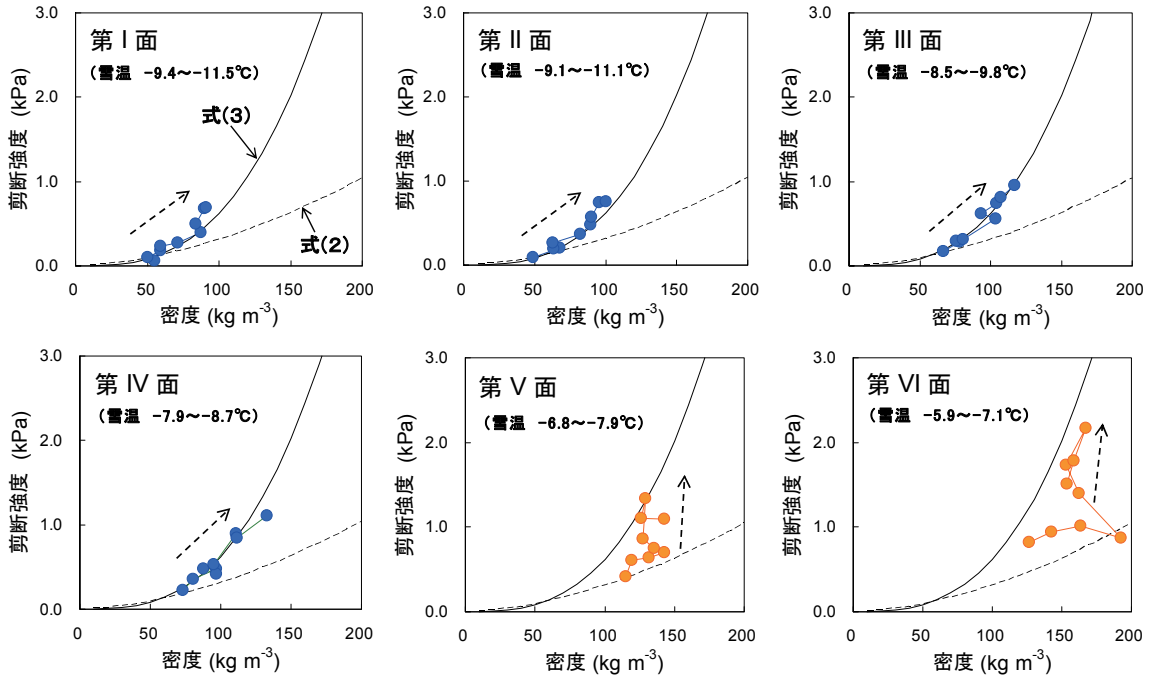

図４　中山峠における積雪面Ⅰ～Ⅵの剪断強度と密度の時間変化
２．１節で示した方法による推定結果．破線矢印は時間の流れを示す．

３．２　札幌における観測結果

図５は，札幌における剪断強度と密度の時間変化の測定結果である．第１面は降雪から２日後にざらめ雪に変化したため５日後の測定は行わなかった．図５より，第２面と第３面は，最初は式（２）に近い値であるが時間の経過とともに式（３）に近づく傾向を示した．この傾向は中山峠の第Ⅴ面と第Ⅵ面と同じである．

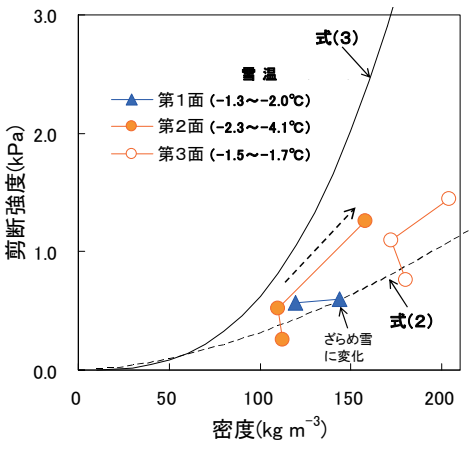

図５　札幌における剪断強度と密度の測定結果
破線矢印は時間の流れを示す．第１面は２日後の測定以降ざらめ雪に変化した．

Copyright ©　2008　（社）日本雪氷学会

図３b より第２面が形成されたときの降雪強度は 5cm h^{-1} と大きく，第３面が形成された 23 日の降雪強度は 1～4cm h^{-1} であった．また第２面と第３面の雪温は，同じ時間変化傾向を示した中山峠の第Ⅴ及びⅥ面より雪温が高かった．

４．考察

今回測定した新雪やこしまり雪の剪断強度は，最初は弱層を伴う場合の式(２)に近い値となり，時間の経過とともに弱層を伴わない場合の式(３)に近づく傾向を示した．中山峠と札幌の積雪は，雪温が異なるもののいずれも大きな降雪強度を伴って形成された．

図６は積雪の剪断強度と圧密過程の関係の概念である．圧密によって積雪密度が増加するとき，雪の内部では様々な物理過程が複雑に関連しながら進行するが，その主なものは粒子の破砕や再配列による充填と，焼結による粒子間の結合力の強まりである(前野・福田，1986)．この物理過程の進行によって剪断強度が大きくなっていくと考えられる．

今回測定した積雪の上載積雪による垂直荷重と圧縮破壊強度を比較すると(図７)，垂直荷重が小さい積雪面付近では，垂直荷重と圧縮破壊強度が同程度であるため圧縮破壊が起きていると考えられる．このため降雪強度が大きい場合，急速に増加した上載積雪荷重によって粒子の破壊や充填が起こって密度が増加する．しかし，粒子の破壊による充填に比べて焼結による粒子間の結合力の増加はゆっくり進行するため，密度増加に比べて剪断強度の増加量は小さく(図６)，密度との関係において弱層の剪断強度に近い値になると考えられる．

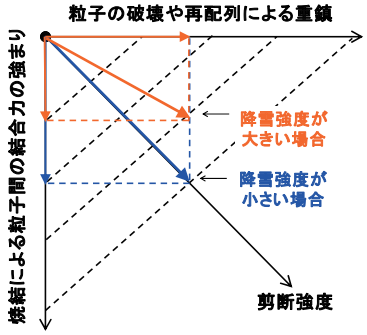

図６　剪断強度と圧密過程の主要物理過程の関係の概念

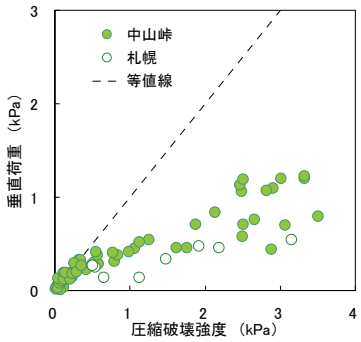

図７垂直荷重と圧縮破壊強度(Watanabe(1977)による)の比較

５．おわりに

本論文は２事例の調査結果である.今後,より多くの多量降雪時の積雪について測定を行い,剪断強度の時間変化に関する具体的なメカニズムの解明を行っていきたい．

参考文献

Jamieson, B., and C. D. Johnston, 2001: Evaluation of the shear frame test for weak snowpack layers. Annals of Glaciology, 32, 59-69.

前野紀一，福田正己，1986：雪氷の構造と物性，東京，古今書院，209pp.

松下拓樹，松澤 勝，伊東靖彦，加治屋安彦，2007：低温下の新雪の剪断強度と圧密に関する観測．寒地技術論文・報告集，23，431-436.

松下拓樹，松澤 勝，加治屋安彦，2008：すり抜け現象を伴う雪崩の発生条件と対策について．第 51 回北海道開発局技術研究発表会 発表論文集(CD-ROM)，ふゆ-10(道)．

Watanabe, Z., 1977: The influence of snow quality on the breaking strength. Sci. Rep. Fukushima Univ., 27, 27-35.

山野井克己，遠藤八十一，2002：積雪におけるせん断強度の密度および含水率依存性．雪氷，64，443-451.

Copyright © 2008 （社）日本雪氷学会