

公益社団法人 日本地すべり学会東北支部

平成 28 年度シンポジウム

積雪・融雪と地すべり

～その不思議な挙動の解明と危険度予測を目指して～

主催：公益社団法人日本地すべり学会東北支部

日程：平成 28 年 4 月 25 日(月) 14：30～17：30

場所：仙台市戦災復興記念館記念ホール

CPD：3.0 時間（公益社団法人日本地すべり学会 認定番号：JLS040）

公益社団法人 日本地すべり学会東北支部 平成 28 年度シンポジウム

「積雪・融雪と地すべりーその不思議な挙動の解明と危険度予測を目指してー」

【趣旨】

地すべり発生の誘因は豪雨、融雪、地震など多種にわたるが、積雪地域、とりわけ東北地方においては気象条件から積雪期～融雪期にかけて発生する地すべりが多い。しかしながら、その活動形態は積雪初期に活動する地すべりがあるほか、厳冬期や融雪後に活動するものなど多様であり、前駆的な降雨や雪荷重、あるいは融雪水の地下浸透量など様々な要因が単独、または相互に関連して発生していると考えられ、一概に誘因を特定できない場合が多々ある。その挙動の解明はいまだ途上にあるものの、様々な視点のもとでの研究や観測事例から積雪期における活動形態に対する新たな知見が得られ、積雪期の地すべり活動における危険度評価に対する取組みもなされてきている。

シンポジウムでは地すべりの根源的な誘因である地下水と積雪、融雪に着目した報告事例から、積雪地域特有の地すべり特性や誘因となる「雪と地下水」の関連性について議論し、地すべり挙動の解明と危険度予測に向けた技術獲得を目的に開催する。

【キーワード】

積雪・融雪 地すべり活動形態 地下水 温度 危険度評価

【講演目次】

(資料参照ページ)

○基調講演 (14:40～15:20)

「季節積雪層と斜面変動の相互作用を考える」

(p1-10)

松浦純生氏(京都大学防災研究所教授 地盤災害研究部門)

○講演 (15:20～15:40)

「新潟県内の地すべりの積雪期における運動特性と水文環境」 (p11-16)

～地すべりの運動は本当に融雪水の地中浸透と関係しているのか?～

佐藤壽則氏(株式会社 日さく)

(15:40～15:55)

「寒候期に地すべり面の力学特性に影響を及ぼす諸要因」 (p17-19)

柴崎達也氏(国土防災技術株式会社)

(15:55～16:05) ～ 休憩 ～

(16:05～16:20)

「豪雪地域の地すべりに及ぼす積雪荷重の影響」 (p20-22)

岡本隆氏(森林総合研究所東北支所)

(16:20～16:35)

「積雪～融雪時期の融雪水浸透における地下水位への影響についての一考察」

(p23-27)

細谷健介氏(新和設計株式会社)

(16:35～16:50)

「積雪期前に活発化する地すべりの要因について」

(p28-29)

大村泰氏(奥山ボーリング株式会社)

○総合討論 (16:50～17:25) 司会(コーディネーター)：岡本隆氏 渡辺修氏

平成28年4月25日(月)

(公社)地すべり学会東北支部シンポジウム
(※:仙台市被災復興記念館)

季節積雪層と斜面変動の
相互作用を考える

防災研究所地盤災害研究部門傾斜地保全研究分野
松浦 純生

本日の内容

1. 降水と季節積雪層

2. 雪水層と斜面地形・災害の関係

3. 積雪層が斜面変動に及ぼす影響

4. 地球温暖化と斜面変動

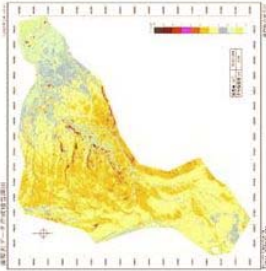
1. 降水と季節積雪層

降水の種類
降水とはある時間に地表面に到達した水の量で、通常、水平面にたまった水深をミリメートル単位を用いて表す。

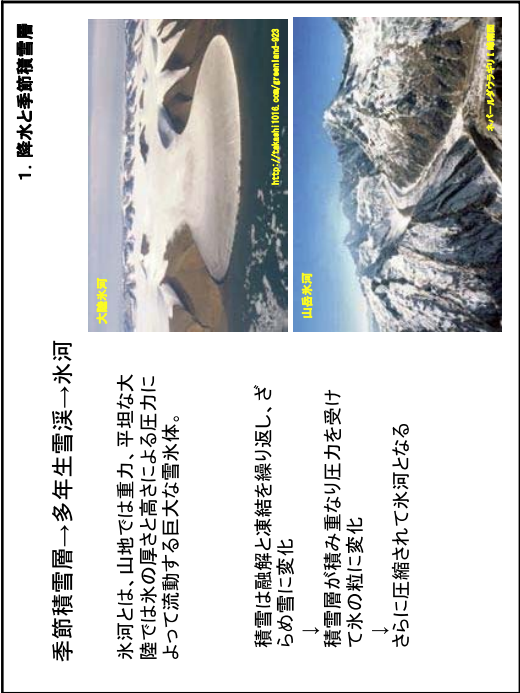
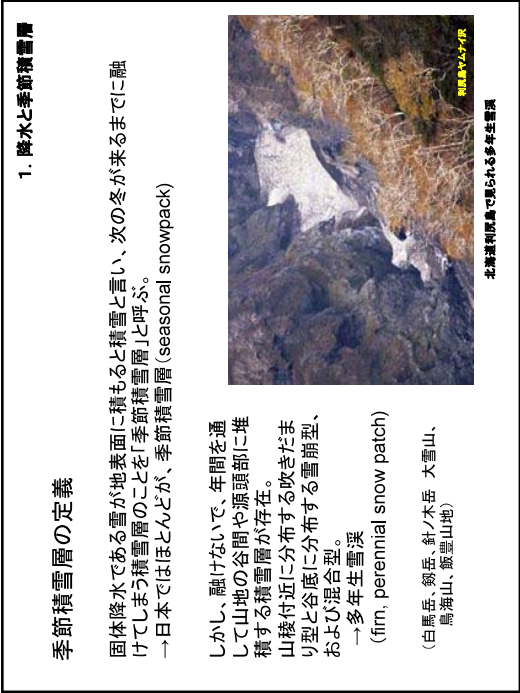
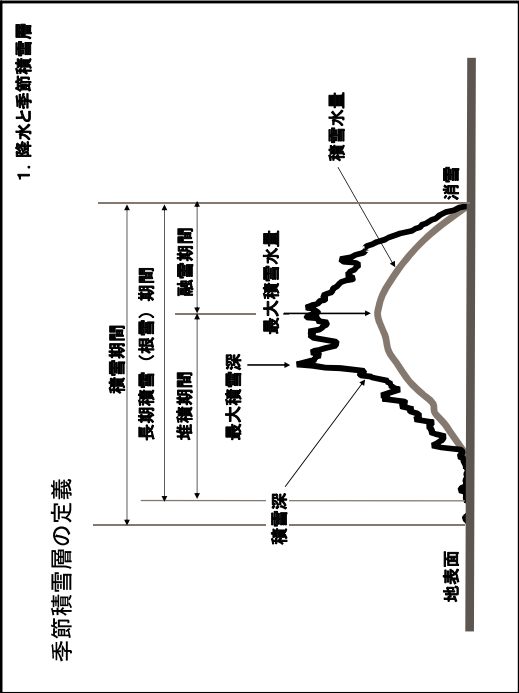
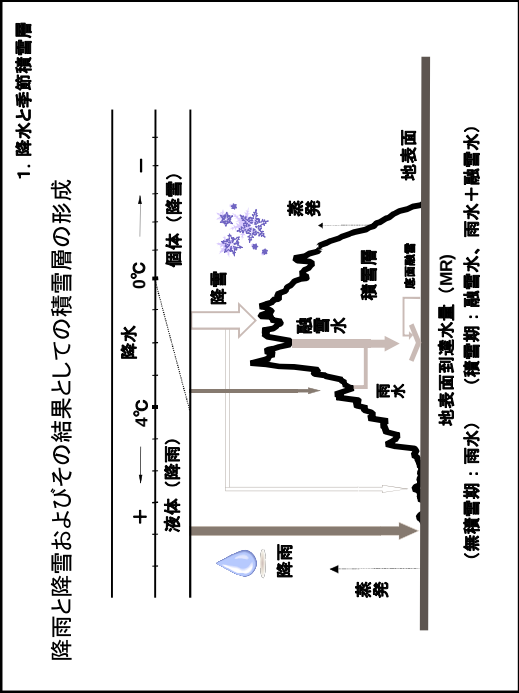
着地直前に液体	着地時に液体	着地直前に液体と固体が混在	着地直前に固体			
			結晶系		結晶核	
雨	着氷性の雨 霧雨	着氷性の雨	雪	霧雪	雪	雹
0.5mm>=	0.5mm<	0.5mm>=	0.5mm<	0.5mm<	5mm>=	5mm<
霰	霰	霰	霰	霰	霰	霰
霰	霰	霰	霰	霰	霰	霰

1. 降水と季節積雪層

降雪と降雪
降雪量の観測は比較的簡単。
しかし、降雪量の観測は意外と難しい。
∴ 風の影響を受けやすい(捕捉率低い)
∴ 融かすための熱源が必要
∴ 削剥と再堆積の繰り返し(再移動)



山陰海岸における積雪量の分布
(気象庁発表、2004)



1. 降水と季節積雪層

世界の多雪地帯

○**温帯性低気圧型降雪**：アメリカ西海岸北部からカナダにかけての地域、スカンジナビア半島西側、アンデス山脈南部西側

○**温帯性低気圧＋季節風型降雪**：北米東部（五大湖の東側）

○**日本列島の日本海側**（気団変質過程＋地形性強制上昇、温帯性低気圧）

1. 降水と季節積雪層

気団の変質による降雪

気団の変質による多量の降雪のため、日本海側の中山間地帯では暖温帯多雪地帯を形成

新潟県の巨摩山間地帯

年降水量は約2,983 mm

年間降水量の47%(1,407 mm)が降雪

平均積雪深3～5 m

山形県の地すべり地における積雪状況

10月10日撮影

新潟県の中山間地帯における積雪環境

2019/09/28

2019/09/28

2019/09/28

1. 降水と季節積雪層

温帯性低気圧による降雪

本州・九州・四国の太平洋側地域の降雪

→温帯性低気圧によるものが多い

北海道では冬期間の気温が低く、降雪量は少ない

→地盤凍結が進行

北海道東部・北部のオホーツク海沿岸

→温帯性低気圧による降雪

北海道釧路市

年平均降水量約1,170 mm

年間降水量の約35%が降雪

関東平野における融雪期の積雪

2019/04/07

地盤凍結した地すべり地

2019/04/07

2. 雪氷層と斜面地形・災害の関係

雪氷層が関係する斜面地形と災害

■ 氷河が関係する地形

○ 侵食作用によるもの

・ 圈谷(カール)

・ トラフ谷(U字谷)

・ 鋸歯状山稜(アレート)

○ 堆積作用によるもの

・ 氷堆積(モレーン)

・ エスカー

■ 氷河が関係する災害

・ 氷河湖決壊洪水、土石流

・ 氷成堆積物の地すべり

・ クイッククレイ地すべり(アイソスタシーによる)

■ 積雪層が関係する地形

・ 雪崩地形(アバランチシュート)

・ 線状凹地

■ 積雪層が関係する災害

・ 融雪洪水

・ 土石流

・ 雪泥流(スラッシュフロー)

・ 雪食

・ 地すべり

平成28年4月25日(月) 14:40～17:30

- 3 -

氷河による地形の形成

水食: glacial erosion

氷河による侵食作用

・氷河底面を研磨する削磨作用 (アブレーション)

・底面の一部をもぎ取るブラッキング

周氷河地形:



北海道で見られる周氷河地形
<https://natgeo.jp/img>
北海道の地



日本でも最初に発見された断崖谷
<https://www.nhk.or.jp>
山形県立川口町



氷河によって形成された断崖谷山脈 (アレート)
<https://www.nhk.or.jp>
山形県立川口町

2. 雪氷層と斜面地形・災害の関係

積雪による地形形成

繰り返り発生する雪崩によって斜面が侵食され、溝状になった地形のことをアバランチシュートというー

知床連山の根室海峡 (羅臼) 側は冬季季節風の風背側にあり、真夏まで雪が残置。浅く窪んだ不毛の砂礫地が発達！



明確に発達したアバランチシュート
<https://www.nhk.or.jp>
山形県立川口町



知床半島南側に発達した断崖谷山脈
<https://www.nhk.or.jp>
山形県立川口町

2. 雪氷層と斜面地形・災害の関係

氷河に起因する災害

氷河湖決壊洪水:
glacial lake outburst flood

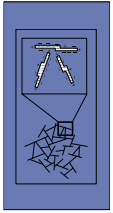
クイッククレイ地すべり

アイヌスタティックリバウンド

スカンジナビア半島、カナダ北部、バルト海沿岸



クイッククレイによる地すべり
<https://www.nhk.or.jp>
山形県立川口町



河川侵食によって発生したクイッククレイ地すべり
<https://www.nhk.or.jp>
山形県立川口町



クイッククレイによる地すべり
<https://www.nhk.or.jp>
山形県立川口町

2. 雪氷層と斜面地形・災害の関係

積雪に起因する災害

多雪地帯で拡大造林のためにばい山を伐採すると、積雪層のグラインドによって雪食 (nivation) が発生することがある。

ばい山とは？: 雪圧によって節節 (ほふく) 性となった落葉低木林で、燃料用の「ばい (粗炭 (そだ))」を採取するための二次林。



雪食によって発生した断崖地
<https://www.nhk.or.jp>
山形県立川口町



広葉樹を伐採した後に発生した断崖地
<https://www.nhk.or.jp>
山形県立川口町

2. 雪氷層と斜面地形・災害の関係

積雪に起因する災害

・雪泥流(スラッシュフロー)



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Whiteout_in_Mt._Zao.jpg

ネバド・デル・ルイス火山(5 389m) (Nevado del Ruiz)は、コロンビアにある活火山。1985 年11月13日15時過ぎに大規模な雪泥流(ラハール)が発生し、100km以上を流下した。

2. 雪水層と斜面地形・災害の関係



新潟県雪崩で発生した雪泥流による道路通行障害



雪泥流に漂流したアルマト市

積雪に起因する災害

地すべり

新潟県の統計データによると、融雪期である4月の地すべり発生件数が最も多く、次いで梅雨期の順番。しかし、最近の研究によって、積雪期以前から活動している地すべりも多数あることが分かってきた。



融雪期に発生した大規模な地すべり

2. 雪水層と斜面地形・災害の関係



新潟県雪崩で発生した大規模な地すべり



融雪期に発生した大規模な地すべり

少雪期冬季に発生した地すべり

積雪が斜面変動に及ぼす影響

積雪層が斜面変動(地すべり)に及ぼす効果

→物理的性質

質量(積雪相当水量としての)

質量(荷重としての)

→力学的性質

せん断強度、引っ張り強さ

→運動特性

グライド作用

3. 積雪層が斜面変動に及ぼす影響

積雪が斜面変動に及ぼす影響

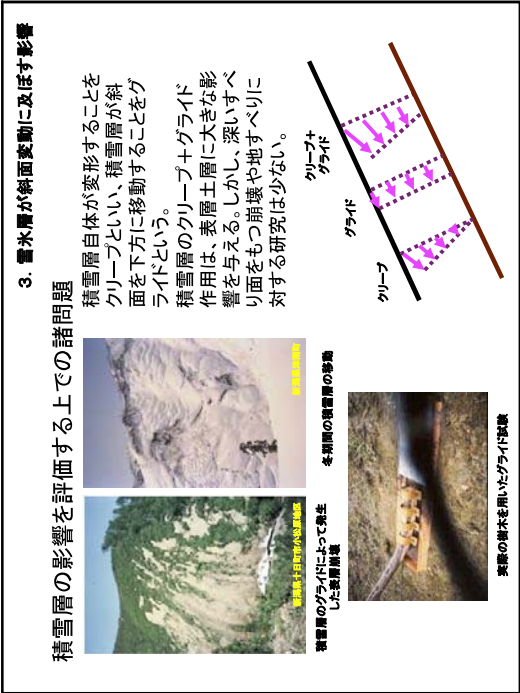
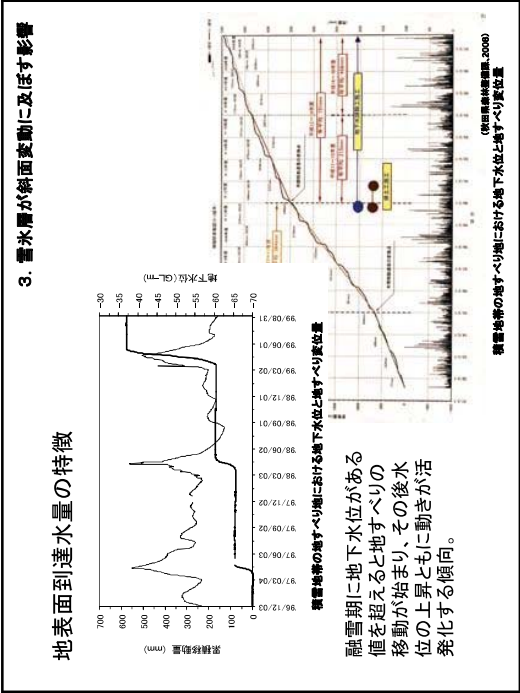
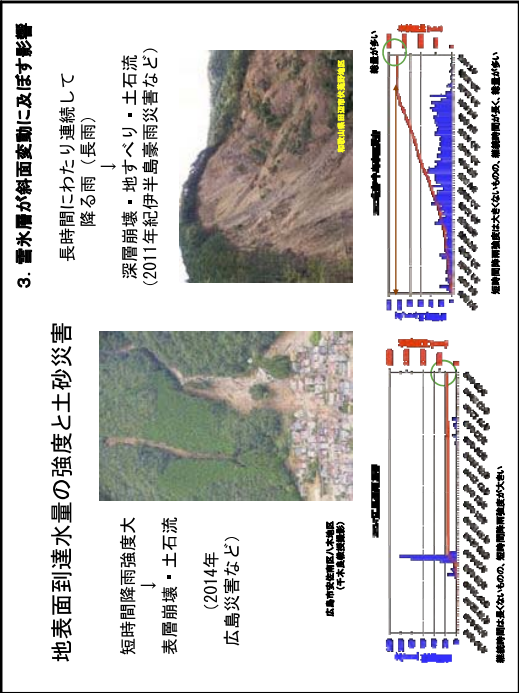
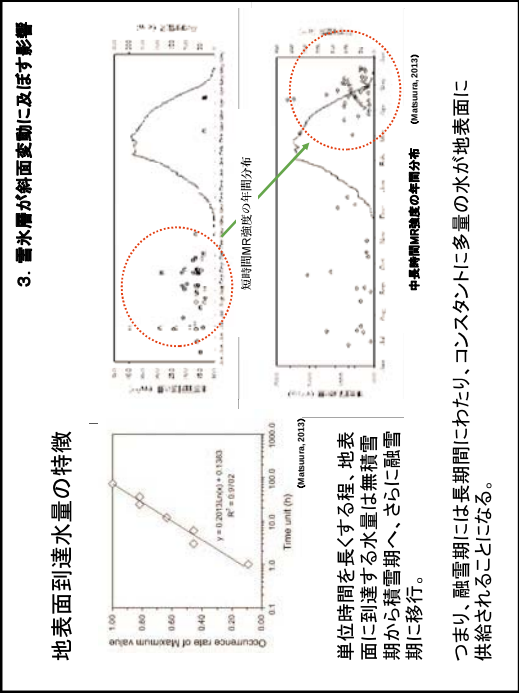
積雪は巨大な水の貯留タンク

融雪期の積雪層の密度は約0.5。例えば、積雪深が3.5mとすると約1.750mmの水が地表面に貯えられていることに相当。これが、融雪期間(約30～50日)に地表面に流出する。つまり、年間降水量に匹敵する量が、約1～1.5ヶ月間の間に、断続的に融けて地表に流れ出ることになる。積雪層は白い石炭とも言われ、貴重な水資源になる一方、急激に解けると、融雪洪水などの水象災害、全層雪崩などの雪水災害、地すべりなどの土砂災害を引き起こす。

3. 積雪層が斜面変動に及ぼす影響



新潟県の中山間地帯での積雪調査



3. 雪水層が斜面変動に及ぼす影響

積雪が荷重として斜面に及ぼす影響

積雪は地盤に大きな荷重を与える。

融雪期の積雪層の密度は約0.5。例えば、積雪深が3.5mとすると約1,750mmの水に相当。

これは、1.75トン/㎡に相当。つまり、約17kPaの荷重が地盤にかかっていることになる。

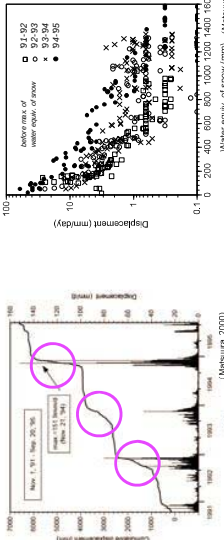
この荷重は、表層地盤の透水性や斜面の安定性に大きな影響をもつ。

無積雪期と積雪期の状況



3. 雪水層が斜面変動に及ぼす影響

浅層のすべり面をもつ地すべりの移動特性



表雪域での地すべり移動量観測

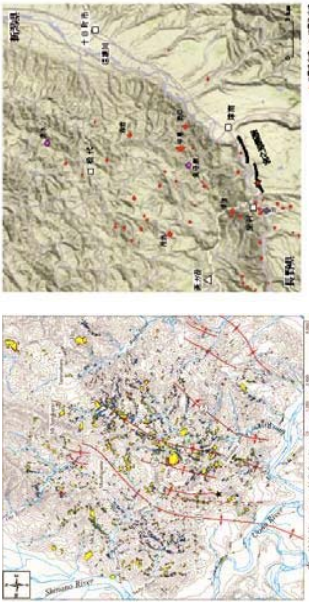
- 地すべりの最大日変位量は当初の予測とは異なり、11～12月の積雪期直前が積雪期初期に出現。
- 各観測年とも秋から冬にかけての変位量が極めて大きい。
- しかし、積雪が始まると変位量は減少する傾向。

積雪水量と移動速度の関係

- 各年とも積雪堆積期に移動速度が減少。
- いずれも、6～9kN/㎡程度になると定常状態に収束。

3. 雪水層が斜面変動に及ぼす影響

積雪期における地震誘起地すべりの特徴



地盤によって誘起した地すべり地帯の分布 (左: 2001年中部地震、右: 2011年東日本大地震)

(大木, 2007)

(地盤研究所新潟県、長野県等の資料、地図は国土院地質院地質調査センター(国) (2010) を基に作成)

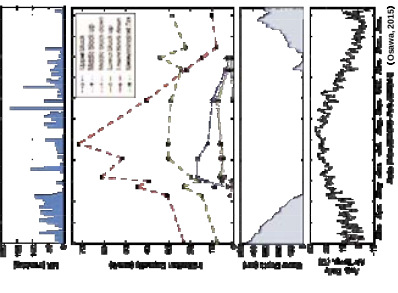
3. 雪水層が斜面変動に及ぼす影響

積雪が表層地盤の透水性に及ぼす影響

積雪荷重は、融雪水の入り口としての表層の透水性に大きな影響を及ぼすと考えられる。

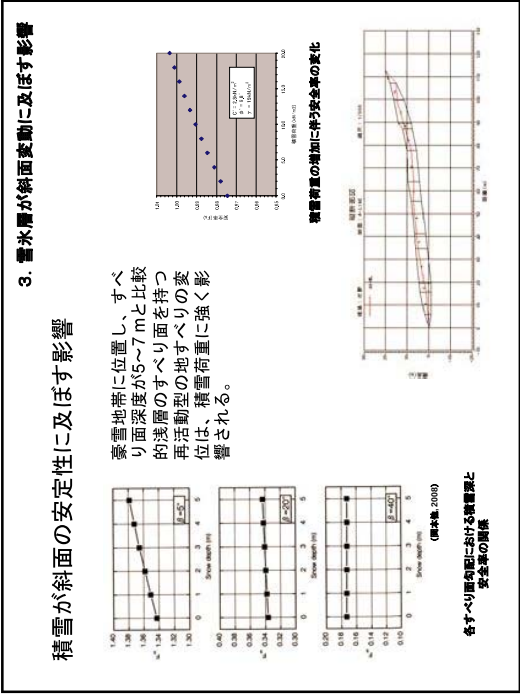
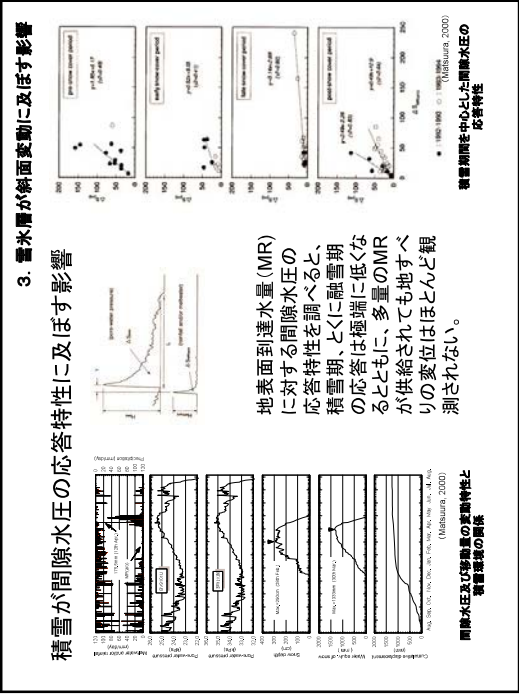
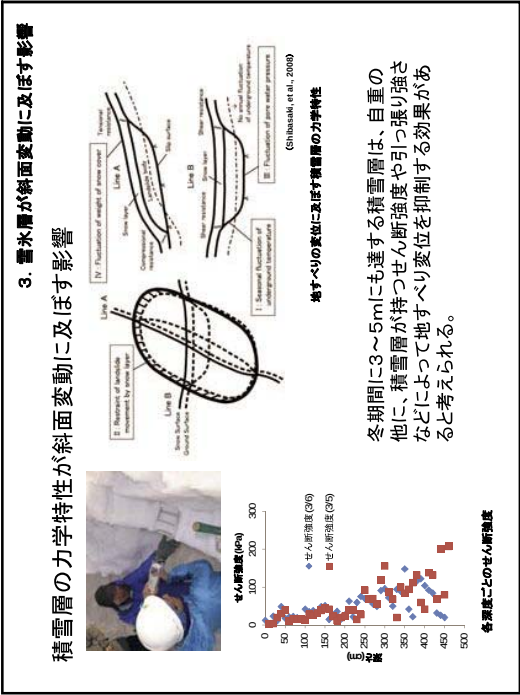
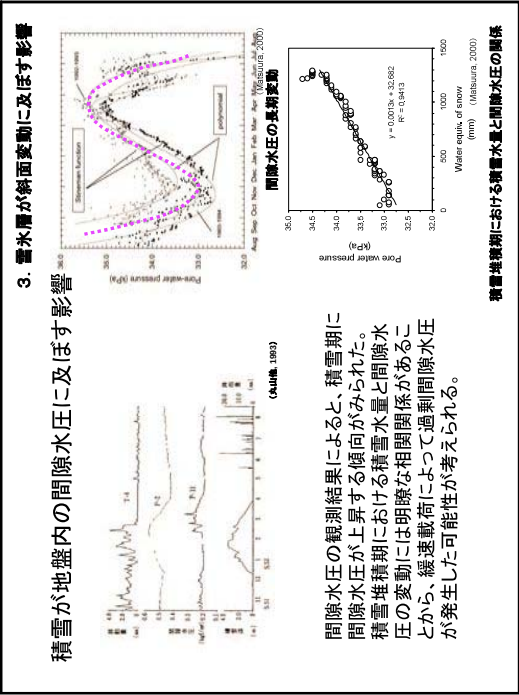


雪水層中の現地透水性試験結果



平成28年4月25日(月) 14:40～17:30

- 7 -



3. 雪水層が斜面変動に及ぼす影響

積雪層の影響を評価する上での諸問題

意外と難しい融雪予測

融雪の大部分は積雪表層で発生する。したがって、表層の融雪量を正確に推定することが重要。

融雪予測法としては、積算暖度法、積雪面低下法、熱収支法などがある。

→それぞれそれぞれ長短有り

積雪期間中の豪雨やフェーンなどの強風による融雪・メカニズムは未解明な部分が多い。

さらに、地表面の状態によっても融雪水量は大きく変化する。

積雪層における熱エネルギーの出入

図は、積雪層のエネルギー収支と融雪過程を示している。左側はエネルギー収支の式で、右側は融雪のメカニズムの断面図である。

4. 地球温暖化と斜面変動

将来の積雪環境の予測

◆温暖化予測シナリオの現状

気象庁気象研究所が開発した大気モデル
MRI-AGCM3.2
↓
非静力学地域気候モデル
(Nonhydrostatic Regional Climate Model; NHRM)

図は、地球温暖化による積雪環境の変化を示している。左側には、北半球の積雪域の分布が示されており、右側には、日本列島の積雪域の分布が示されている。

3. 雪水層が斜面変動に及ぼす影響

積雪層の影響を評価する上での諸問題

積雪層厚の分布

積雪は削剥と再堆積を繰り返すため(再移動)、積雪層厚の分布は変化し、斜面では大きく偏在する。頭部陥没帯に堆積すれば頭部載荷に、末端部に厚く堆積すれば、抑さえ盛土としての効果を発揮。

図は、積雪層厚の分布を示している。左側には、積雪層厚の分布の断面図が示されており、右側には、積雪層厚の分布の地図が示されている。

3. 雪水層が斜面変動に及ぼす影響

積雪層の影響を評価する上での諸問題

意外と難しい地表面到達水量の観測と推定

図は、積雪層の厚さや融雪過程を示している。左側には、積雪層の厚さの断面図が示されており、右側には、融雪過程の断面図が示されている。

4. 地球温暖化と斜面変動

将来の積雪環境の予測

◆降雪量分布の変化予測

年 1月 2月 3月

(集計中, 2013)

年及び月降雪量の変化

降雪量は北海道を除く地域で減少

日本海側での減少が大きく、多いところで年間400mm程度の減少

北海道の内陸では降雪量が増加。

4. 地球温暖化と斜面変動

将来の積雪環境の予測

◆降雪量変化量の予測

降雪量の変化(12~3月)/標高1000m以上

降雪量の変化(12~3月)/標高1000m以下

(集計中, 2010)

◆東北地方の日本海側および太平洋側のいずれも降雪量は減少

◆東北地方では標高の高低にかかわらず降雪量は減少

◆北海道地方の標高の高い箇所では降雪量が増加

4. 地球温暖化と斜面変動

積雪環境の極端な変動

◆寒冬多雪と暖冬少雪の振れ幅が増大？

寒冬多雪と暖冬少雪年における地表積雪水深(MR)

地表積雪水深(MR)とは：「融雪」、 「融雪水」、 「降雨+融雪水」

(Matsuzawa, 2013)

4. 地球温暖化と斜面変動

将来の積雪環境の変動が斜面災害に及ぼす影響

◆発生場所や時期、種類の变化

◆場所

→災害発生危険箇所の変化
(降水分布とそれに伴う積雪環境)

◆時期

→災害発生危険時期の変化
(融雪時期の変化、最寒期でのリスクの増大)

◆種類

→災害の形態や種類、規模などの変化
(侵食、表層崩壊、深層崩壊、地すべり等)

→複合型災害
(積雪期間中の豪雨、フェーンなどの強風)

平成28年4月25日(月) 14:40～17:30

- 10 -

新潟県内の地すべりの積雪期における運動特性と水文環境 ～地すべりの運動は本当に融雪水の地中浸透と関係しているのか？～

佐藤 壽則（株式会社日さく）

1. はじめに

新潟県は地すべり多発県であり、積雪地域でもある。積雪地域で発生する地すべりの多くは、融雪が進むにつれて地表面が現れ、亀裂等の現象が目視されることによって確認される。破壊的な地すべりもこの時期に発見され、報道されることが多い。このことから、積雪地域の地すべりは融雪期に運動すると認識する人も多く、「融雪地すべり」という用語も使われている。

一方、11～12月の降雪開始期にも地すべりが発生することがあり、降雪の進行とともに運動を停止する例が認められるなど、積雪期における地すべりの運動特性は多様であると推察される。

自動観測機器が進歩・普及し、積雪下における連続的のデータが多く収集・蓄積されるようになったため、筆者はそれらを整理し、運動特性について考察した¹⁾。本発表はその概要を述べるとともに、考察で導かれた「融雪期における融雪水の地下浸透は地すべりの運動開始原因ではない」ことに対して新たな知見を加え、とくに晩秋～初冬(積雪初期)に運動を開始する地すべりの機構について私見を述べる。

2. 積雪期における地すべりの運動特性

(1) 調査方法

地すべり防止工事が施工される前の自然斜面で、通年にわたって地中変位・移動量の自動観測が行われた

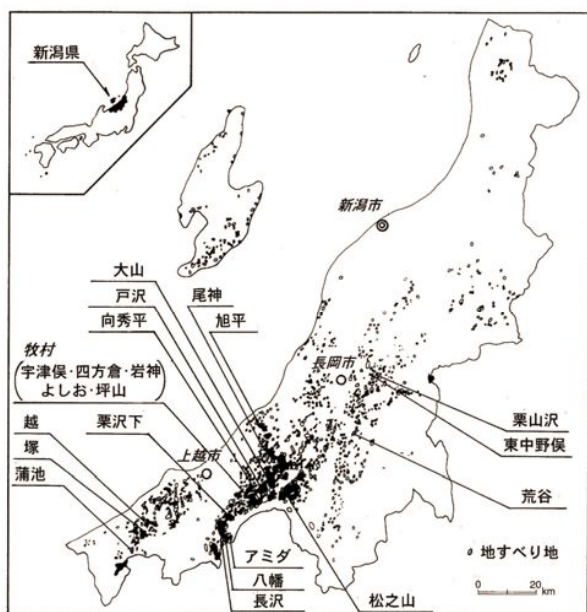


図.1 調査位置図 (佐藤, 2004¹⁾)

新潟県内各地のデータを収集した。データは 1994～2003 年の 10 年分で、新第三系堆積岩類分布地域を対象とした。地すべりの運動を捉える計器はパイプひずみ計およびワイヤー式多層移動量計とし、いずれもメモリーカード交換式のデータ収録器を用いた自動観測システムによるデータとした。

データを整理する際は、1 年以上の連続したデータであること、回帰性の変動でないこと、1 か月以上累積変動がみとめられる場合を 1 事例とすること、などの統一基準を設けた。抽出した事例は 21 地区(図. 1)の 65 事例におよぶ。各事例について横軸を時間、縦軸をひずみ・変位量としたグラフを作成し、グラフの変化状況を比較した。また、グラフには近傍の気象観測地点における日降水量・積雪深もあわせて示した。

(2) 調査結果

① 積雪期の運動パターン

グラフの変動傾向の類似性から、積雪期の運動パターンを以下の 5 つに分類した。なお、ここでは積雪期を積雪初期(降雪・融雪が繰り返す時期)、積雪増加期(積雪深が増す時期)、融雪期(連続的に積雪深が減る時期)に分けている。

- 積雪期一定速度型：積雪初期の 11～12 月に運動を開始し、融雪期となる 3～4 月まで変動速度がほぼ一定で、かつ継続的に運動するタイプである。
- 積雪期加速型：11～12 月に緩やかに運動を開始し、融雪期に近づくにつれて運動速度が速くなるタイプである。さらに細かく見ると、徐々に運動速度が増す場合や、ある日を境に運動速度が急激に増す場合、積雪初期よりも 4 か月前の梅雨期から緩慢ながら運動を開始する場合などが含まれる。
- 積雪初期運動型：11～12 月に運動を開始し、積雪深が最大となる積雪増加期(1 月中旬～2 月中旬)には運動が収束する変動パターンを示すタイプである。
- 融雪期運動型：最大積雪深を記録した後の 3～4 月(いわゆる融雪期)のみ運動を示すタイプである。
- 積雪期 2 段階運動型：積雪初期の 11～12 月に運動を開始し、積雪深が深くなる積雪増加期(1 月～2 月)には運動が一旦収束した後、融雪期となる 3～4 月に再び運動する傾向を示すタイプである。

② 各運動パターンの割合

各運動パターンの全体に占める割合を示すと、図. 2 のようになる。積雪期一定速度型と積雪期加速型がそれぞれ 45%・32%と多く、二つ合わせて全体の 8 割近

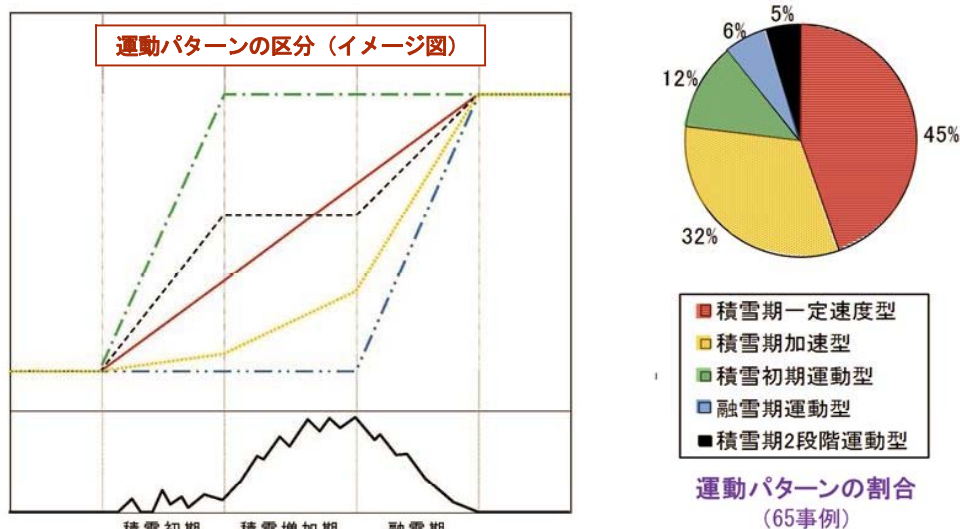


図.2 積雪期における運動パターンと全体に占める割合 (佐藤, 2004¹⁾を改変)

くを占めた。一方、3～4月だけに変動を示す融雪期運動型の割合は、全体のわずか6%に過ぎなかった。

③ 運動開始時期

運動開始日を月別のヒストグラムにあらわすと、図.3 になる。なお、新潟県内で1976～1997年に発生した地すべり件数の月別割合²⁾もあわせて示した。これによると、地すべり運動を開始するのは11～12月の積雪初期が圧倒的に多く、この2か月で全体の40%を占める。一方、融雪期の3～4月にはじめて運動を開始する地すべりは、全体の5%にも満たない。4月にピークがあらわれる地すべり発生件数のヒストグラムと比べると、全く異なった分布を示している。

(3) 運動特性からみた融雪と地すべりの関係

一般的に、積雪地域で発生する地すべりの多くは、3～4月の多量の融雪水が地下に浸透することにより、すべり面に過剰な間隙水圧が作用することが主な原因であると説明されている。しかし、観測結果では全体の9割以上が融雪期以前に地すべり運動を開始してい

る。前述した運動パターンを見ると、積雪初期運動型は融雪期に変動を示さず、積雪期一定速度型も融雪期に運動速度を増すことはない。つまり、この2つのパターンは、3～4月の融雪との関係が薄いと考えてよい。

一方、融雪期運動型、積雪期加速型および積雪期2段階運動型は、融雪期に顕著な累積変動が開始または増大することから、3～4月の融雪水の地下浸透と密接な関係があると推察できる。ただし、積雪期加速型と積雪期2段階運動型については、融雪期の前にすでに地すべり運動を始めていることを指摘しておく。

「融雪地すべり」が発生した際に住民への聞き取り調査を行うと、地すべり発生箇所では前年の秋あるいは夏にすでに亀裂が発生しており、前兆現象があったという証言が得られることが多い。このように、本格的な積雪の前に発生した亀裂などから融雪水が浸透し、移動速度を速めて「融雪地すべり」とされる破壊的な地すべりへと進行したと考えられる。つまり、融雪期にあたる3～4月の融雪水の地下浸透は、「地すべり運動を加速」させる原因にはなり得るが、「地すべり運動を開始」させる原因とはならない場合が多いと考えられる。

(4) 運動の反復性

パイプひずみ計レベルの微弱な変動ではあるが、3年以上連続して毎年同じ時期に同様の運動パターンを示す現象が認められた(図.4)。また、2年連続して同じ時期に同様の運動パターンを示した事例は半数以上に上った。それらの多くは、梅雨や台風に伴う100mm/dayもの降雨量でも運動を開始しない。このことは、融雪や豪雨ではない、毎年定期的に繰り返される何らかの因子が、地すべり運動の開始に直接影響を与えていると考えられる。

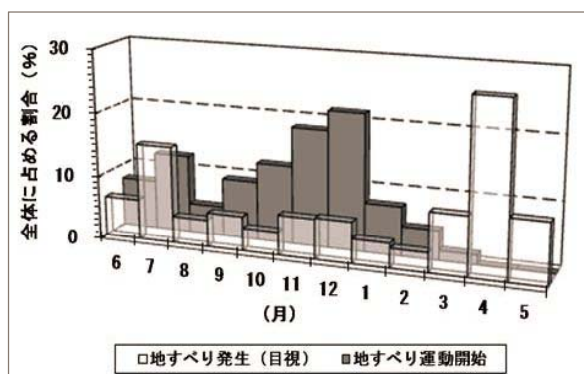
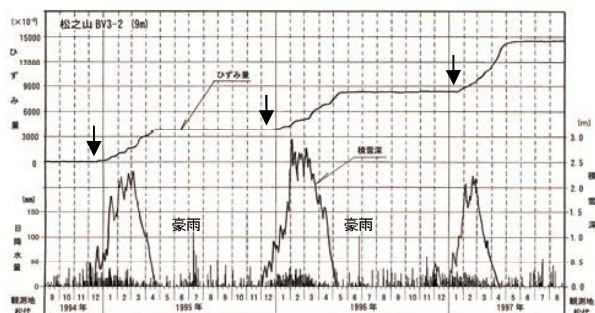


図.3 地すべりの発生と運動開始時期の月別割合 (佐藤, 2004¹⁾を改変)

図.4 地すべりの運動が反復する例 (佐藤, 2004¹⁾に加筆)

3. 地すべり地の水文環境

(1) 高塩分濃度地下水の湧昇

運動特性調査の対象とした新潟県内の新第三系堆積岩類が分布する地域には、褶曲構造が複数配列している箇所がある。このうち、背斜軸付近に位置する複数の地すべり地には、高濃度の Na-Cl 型地下水 (以下、高塩分濃度地下水) の存在が認められる。

東頸城丘陵の長倉山背斜が鷹羽断層によって分断される地域に位置する宇津保地すべり地でも、高塩分濃度地下水が認められる。伊藤ほか(2003)³⁾・古谷ほか(2005)⁴⁾によって、運動が活発な地すべり土塊だけに高塩分濃度地下水が分布すること、深度を増すほど高塩分濃度地下水の濃度が増加すること、高塩分濃度地下水は石油・天然ガス付随水に類似する化石海水起源の塩水であること、などが明らかにされた。そして筆者は、解析深度 1000m の電磁探査を実施することにより、高塩分濃度地下水が地下深部から断層・亀裂や地層の間隙を経て湧昇する状況を可視化した⁵⁾。渡部ほか(2009)は、このような高塩分濃度地下水は異常高压熱水に由来し、とくに大規模地すべりの発生機構に関係すると指摘している⁶⁾。

(2) 慢性的高水位環境の形成

東頸城～中頸城地域では、後背地のない尾根の直下で、河川等による末端の侵食がないにもかかわらず、しばしば地すべりが発生する。また、その地すべり地でボーリング調査を行うと、集水面積が小さい割に地下水は豊富で、地下水の水質は表流水と類似しており、地下水位が慢性的に高い事例が認められる (図. 5)。そのため、地下水位の変動と地すべり運動 (積雪初期に運動を開始) との明瞭な関連を解析しにくい。

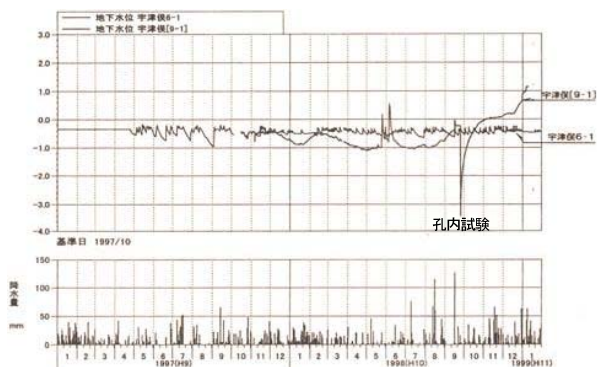
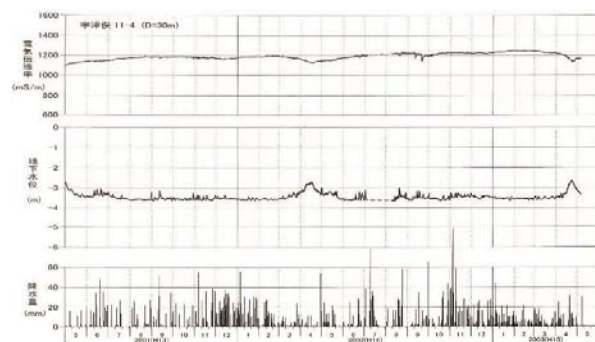
一方、前述の宇津保地すべり地などでは、地下深部から上昇した静水圧を上回る高塩分濃度地下水が、比較的に浅い位置に存在し続けている。電気伝導度や部分ストレーナー水位は年間を通してほぼ一定で、降水との明瞭な関係は認められない (図. 6)。このことは、高塩分濃度地下水は高い水頭圧と水量をもって常に深部から供給され続けており、多量の降水・融雪水が地下へ浸透するにもかかわらず、それと混合・希釈が起こら

ないことを示す。つまり、高塩分濃度地下水の存在が天水の地下深部への浸透を妨げ、天水起源の地下水の流動系を浅く小さい循環へと規制していることを意味し、地すべり地の地下水位を常に高い状態に保つ要因の一つとも考えられる。そして、静水圧を大きく上回る異常高压熱水系と、静水圧に近い地すべり斜面の地下水系との間に生じた圧力勾配は、地表から浸透した水の流れを一方向に規制しており、山地や丘陵で天水が地下に浸透しても地下深部まで流動することなく、短時間で地表に湧出、あるいは短時間での地下水位上昇など、独特の水文環境を形成している。

この現象は、地すべりの発生と密接に関係する間隙水圧の上昇に影響を及ぼすものと考えられる。加えて、地下深部における異常高压熱水系の存在は、すべり面が浅い地すべり土塊への高塩分濃度地下水の直接的な供給がない場合でも、定常的に斜面の地下水位を高い状態に保つ水文構造をつくりだし、間接的に地すべり発生の水文地質学的素因となっている。すなわち、地すべりが運動しやすい条件 (場) の形成に寄与していると考えられる。

(3) 地下水の 3 層構造

既往研究や筆者らの調査結果を総合すると、東頸城～中頸城地域の地すべり地、とくに背斜軸付近の地すべり地における地下水には、図. 7 に示す 3 層構造のモ

図.5 大きな変化がなく慢性的に高い地下水位の例 (地すべり学会新潟支部, 2003⁷⁾に加筆)図.6 高塩分濃度地下水観測孔における電気伝導度・部分ストレーナー水位の観測例 (佐藤, 2014⁸⁾)

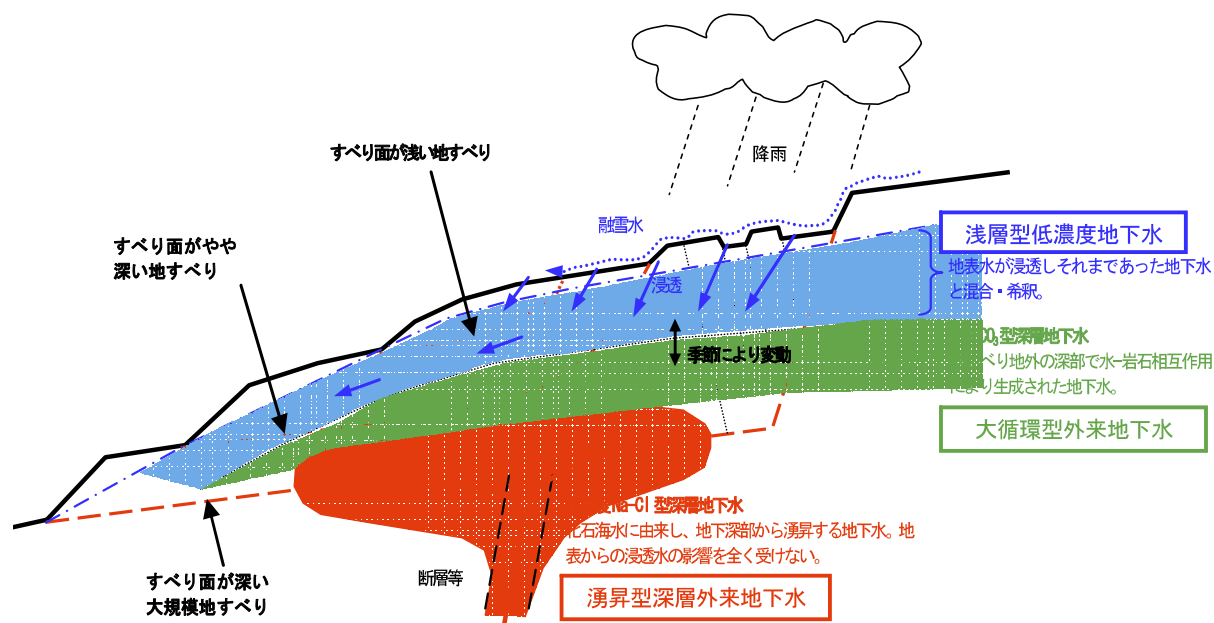


図.7 地すべり地における地下水の3層構造（佐藤，2014³⁾に加筆）

デルが考えられる。

① 浅層型低濃度地下水

地表付近の地下水は、陽イオンが Na^+ または Ca^{2+} 、陰イオンが HCO_3^- または SO_4^{2-} が卓越し、全イオン濃度が概ね 10meq/L 以下の低い濃度の水質を示す。また、地下水位は概ね深度 3m 以浅で浅く、降雨に応じて敏感に変動する。これは、降雨・融雪水などの天水が地下へ浸透し、それまであった地下水と混合・希釈が行われる領域と考えられる。

多くの地上水抜きボーリングから排出される地下水、あるいは地下水観測孔浅層部の孔内水は、この領域の地下水である。すべり面深度が概ね 10m 以浅の浅い地すべりは、この領域の中にあると考えられる。降雨や融雪によって多量の天水が地下へ浸透することにより、すべり面の間隙水圧が上昇し、地すべり運動が開始すると説明がつく。いわゆる「融雪地すべり」の多くは、そのようなすべり面の浅い地すべりであると理解している。

② 高濃度 Na-Cl 型深層地下水（湧昇型深層外来地下水）

背斜軸や断層付近の地すべり地では、地下深部に高濃度の Na-Cl 型の水質を示す深層地下水が賦存している領域がある。この地下水は、石油・天然ガス付随水（化石海水）に由来する異常高圧熱水が起源であり、高い圧力をもって常に地下深部から湧昇する外来地下水である。地下水の圧力水頭・電気伝導度・水温ともに年間を通してほぼ一定で、地表からの浸透水との混合・希釈は起こらない。

高塩分濃度地下水の地下深部からの湧昇経路は、断層や破碎帯等の亀裂が発達している部分を上昇していると考えられる。ただし、宇津保地すべりのように、地層の傾きに規制されて地層中の間隙を選択的に上昇

する場合もある。

この深層地下水が地下深部に存在し続けることにより、天水の地下深部への浸透を妨げ、恒常的に地下水位の高い状態を形成している。ただし、地下水位・電気伝導度・水温ともに年間を通してほぼ一定であることから、地すべり運動を開始させる直接的な原因とは考えにくい。

③ Na-HCO_3 型深層地下水（大循環型外来地下水）

表層における天水の浸透による混合・希釈が起こる領域（浅層型低濃度地下水）と、地下深部にあって地表からの浸透水との混合・希釈が起こらない領域（高濃度 Na-Cl 型深層地下水）との間には、両者との混合程度が小さく、両者と異なる水質を示す領域がある。その水質は中程度の濃度（全イオン濃度が $10\sim 100\text{meq/L}$ ）の Na-HCO_3 型を示し、場所によっては Cl^- 濃度がやや高い場合もある。

この Na-HCO_3 型地下水は、地下の比較的深部まで涵養する過程で、水-岩石相互作用により水質が生成されることが考えられる。天水が浸透して水-岩石相互作用によって Na-HCO_3 型地下水に変化するまでには長時間を要するため、地すべり斜面内に認められる Na-HCO_3 型地下水は、地すべり斜面あるいはその近傍で浸透した天水が変化して滞留したものではなく、地すべり地外（例えば後背山地）から浸透し、長時間をかけて流動してきた外来地下水と考えられる。

Na-HCO_3 型地下水の分布・挙動に関する調査・観測事例は極端に少ない。伊藤ほか(2003)は宇津保地すべり地の2孔で観測を実施しており、それによると地下水温は1年周期で季節変動をしている(図.8)。日降水量と連動した変動は全く認められないことから、その場で浸透した天水との混合・希釈は起こっていないと考

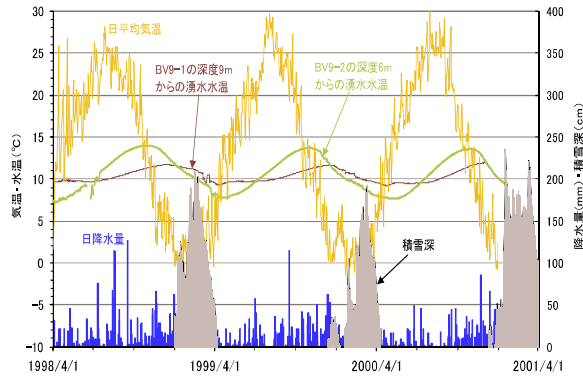


図.8 Na-HCO₃型地下水自噴孔の水温の経時変化
(伊藤ほか, 2003³⁾を改変)

えられる。そして、この型の地下水は、すべり面がやや深い地すべりのすべり面付近(概ね深度 10~30m)に分布しているため、地すべり運動に影響を与えている可能性がある。

4. 積雪初期における地すべり運動開始機構

前述のとおり、宇津俣地すべり地では、Na-HCO₃型の水質を示す大循環型外来地下水の水温が、1年周期で季節により緩やかに上下変動している。この水温の極大期は11~1月、極小期は5月前後で、地すべり運動

が開始する時期と水温の極大期が一致する。平野の地下水の水温は16~18℃であり、宇津俣地すべり地の標高が約500mであることから、気温遞減率(0.6℃/100m)を差し引くと、地すべり地の地下水の水温は13~15℃と見積もられる。大循環型外来地下水の水温の極大期が概ねこの温度に相当し、極小期はそれより3~7℃低い。これは、12~5月に大循環型外来地下水が冷却され、6~10月に冷却が停止し、水温が回復に向かうと解釈できる。宇津俣地すべり地における湧昇型深層外来地下水(高塩分濃度地下水)は、天水の浸透による影響を受けないから水温は一定であり、大循環型外来地下水の冷却は、多量の融雪水が地中へ浸透したことによる影響と考えざるを得ない。

すべり面深度がやや深い(例えば深度 10~30m)地すべり地において、多量の融雪水が地中へ浸透する融雪期と大循環型外来地下水の水温が極大になる積雪初期(11~1月)の地下水挙動のモデルを図.9に示した。両時期とも地下深部には通年で一定深度以深に湧昇型深層外来地下水が存在しており、地下水位は浅い位置にあつて見かけ上ほぼ一定と設定した。

融雪期には大循環型外来地下水の流動に比べて多量の低温の融雪水が地中に浸透するため、浅層型低濃度地下水と大循環型外来地下水の境界が深部へ下降する。

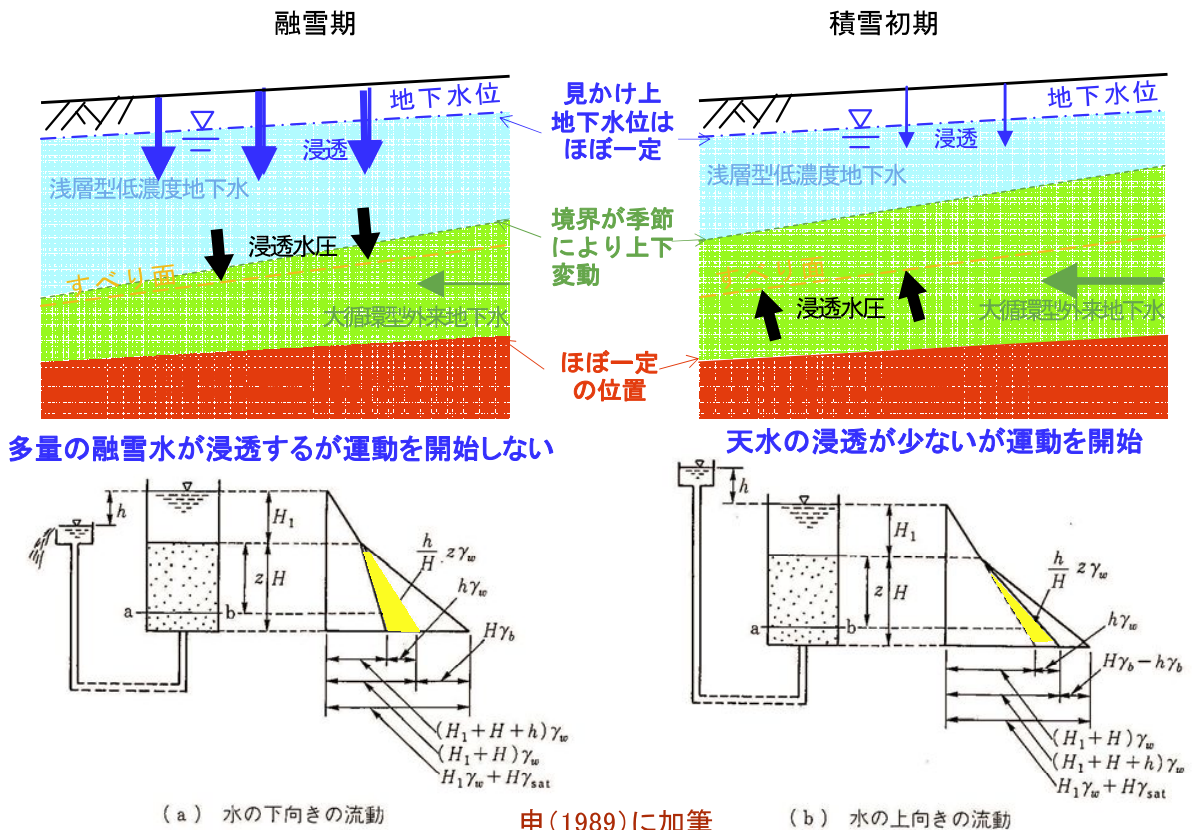


図.9 大循環型外来地下水の相対的割合の増大による地すべり運動開始 (佐藤, 2014⁸⁾)

このような地下水の下向きの流動が長時間連続する場合、浸透水圧が下向きに作用するため、すべり面の間隙水圧が減少すると考えられる(申, 1989⁹⁾:図. 9-a)。融雪期であっても地すべり運動を開始しないことは、これにより説明が可能である。

他方、融雪が終了した6月以降は多量の天水が地中に浸透しないため、大循環型外来地下水の流動割合が大きくなり、浅層型低濃度地下水と大循環型外来地下水の境界が浅部へ上昇する。低温の融雪水の浸透が本格化する直前の積雪初期に、その境界が最も高い位置まで上昇する。このとき、下向きの浸透水圧はほとんど作用していないため、大循環型外来地下水の水圧が相対的に高くなり、地下水の上向きの流動が長時間連続する。そのため、浸透水圧は上向きに作用し、すべり面の間隙水圧も増加すると考えられる(申, 1989⁹⁾:図. 9-b)。多量の天水の浸透がない時期に地すべり運動を開始し、それが毎年繰り返す現象は可能性の一つとして、このような機構が考えられる。また、このときの運動で地表面にわずかな亀裂を生じることにより、融雪期にその亀裂から融雪水が地中へ浸透して比較的すべり面の浅い「融雪地すべり」へと転換する場合もあると考えられる。

5. おわりに

本発表では、新潟県内の地すべりを中心に積雪期の運動特性について述べたが、地質・気象条件等が類似する東北日本海側でも特性が共通している可能性がある。東北支部諸氏による今後の観測事例の収集・検討を期待する。

また、積雪期における地すべりの運動特性には多様性があり、様々な要因が単独または相互に関連していると考えられる。本発表では地下水の水質に着目し、

地すべり地の地下水の3層構造や、大循環型外来地下水の相対的増大モデルを提起したが、三次元での検討が不十分であるなど、検討の余地は多いと考える。今後、さらに議論が深まることを期待する。

最後に、本発表に際しては新潟大学災害・復興科学研究所の渡部准教授から有益な助言を頂いた。あらためてお礼を申し上げる。

引用文献

- 1) 佐藤ほか(2004): 積雪期における新潟県内の第三紀層地すべりの運動特性. 地すべり, Vol. 41, No. 1, 37-42.
- 2) 地すべり学会新潟支部(1998): 新潟の地すべり' 98. p. 13.
- 3) 伊藤ほか(2003): 第三紀層地すべりの高濃度地下水の特性ー新潟県宇津俣地すべりを例にしてー. 地すべり, Vol. 39, No. 4, 1-8.
- 4) 古谷ほか(2005): 新潟県東頸城地域の地すべり土塊内における高濃度 Na-Cl 型地下水の分布とその起源. 応用地質, Vol. 45, No. 6, 281-290.
- 5) 佐藤ほか(2013): 新潟県宇津俣地すべり地における Na-Cl 型地下水の湧昇過程. 第52回日本地すべり学会研究発表会講演集, p. 86.
- 6) 渡部ほか(2009): 新潟地域の大規模地すべりと異常高圧熱水系. 地学雑誌, Vol. 118, No. 3, 543-563.
- 7) 日本地すべり学会新潟支部(2003): 宇津俣地すべり. 第31回地すべり現地検討会資料.
- 8) 佐藤壽則(2014): 地すべり運動に影響を及ぼす深層地下水の挙動. 新潟大学博士論文.
- 9) 申潤植(1989): 地すべり工学ー理論と実践ー. 山海堂.

寒候期に地すべり面の力学特性に影響を及ぼす諸要因 Some factors influencing the shear strength properties of slip surface soils during cold season

柴崎達也*(国土防災技術株式会社)

キーワード:スメクタイト, 残留強度, 地温, 間隙水の化学特性
Keywords: Smectite, Residual strength, Ground temperature, Pore-water chemistry

1. はじめに

東北地方を含めた日本海側の新第三系や火山周辺の熱水変質帯などでは、融雪期を含め寒候期に地すべりが数多く発生している。新潟県内で発生した地すべりの観測データによると、晩秋～初春の融雪期にかけて多様な地すべりの運動パターンが報告されている(佐藤ら, 2004)。過去の地すべり学会の研究発表会などで報告された地すべりの動態観測事例などをみると、佐藤ら(2004)が分類した寒候期の5つの運動パターン(積雪初期活動型、積雪期2段階活動型、積雪期一定速度型、積雪期加速型、融雪期活動型)は、東北・北陸地方、長野県北部などの積雪地帯で広く報告されている。

地すべり地の地下水位の変動パターンと動態との関係に注目すると、大規模な地すべりほど、水位上昇と移動(変位)との因果関係が明瞭な事例が多く、融雪期に集中して移動する傾向がある。一方、移動体が泥濘化した規模が小さな地すべりなどでは、地下水位が恒常的に高く、水位変動と地すべりの発生タイミングや移動時期との関係が判然としない事例も確認される。気象条件が似た同じ地域で発生する地すべりでも、移動開始のタイミングや移動時期が異なるケースがあり、その要因解明が課題となっている。

新第三紀の堆積岩類や熱水変質帯で発生する地すべりの特徴として、すべり面粘土にスメクタイトが多量に含まれていることが指摘できる。スメクタイトは特異に小さな残留せん断抵抗角を発現する(摩擦係数0.1前後)ため、緩い傾斜でも斜面が不安定化しやすい。粘土鉱物の中でも、膨潤という特異な特性を持ち、水を多量に含んだ状態では、温度や化学的な性質(pH, ECなど)に敏感なレオロジー特性を示すことも古くから知られている。このような粘土鉱物をすべり面材料とする地すべりでは、地温や水質などの地盤環境の変化が地すべりの発生に関与する可能性も否定できない。粘土の残留強度に及ぼす温度の影響を調べてみると、スメクタイトに富む粘土の残留強度は温度に依存する特性も明らかになってきている(柴崎・山崎, 2010)。また、海外の研究によると、間隙水の化学的特性(塩濃度など)が土質強度に及ぼす影響に関する研究も古くから行われている。今回の話題提供では、地すべりの発生に影響を与える因子として、間隙水圧(地下水位)以外にも地温、水質などにも注目していく必要があることを紹介したい。

2. 粘土の残留強度特性に及ぼす温度の影響

2.1. リングせん断試験機を用いた多様な土質試料を用いた検証

リングせん断試験機を用い、残留せん断状態にある粘性土・砂質土に対して、せん断強度の温度依存性を検証した。試験供試体の冷却および加熱は、試験機の外部に設けた水槽を温度管理して、せん断箱側の水槽の水を循環させることにより長期間の試験供試体の冷却および加熱を実現させた。

図-1は、Ca型ベントナイト(WL=167%, IP=120)を用い、せん断速度0.02mm/min、垂直応力200kPa下の残留せん断状態において、加熱と冷却の影響を検証した結果である。摩擦係数 τ/σ_N の挙動を20℃強の室温条件と比較すると、10℃弱の低温時には低下、50℃付近の高温時には大きな上昇が認められた。また、せん断挙動の特徴的な現象として、室温及び高温下において τ/σ_N の小刻みな変動(スティック・スリップ挙動)が認められ、高温状態ほど振幅および周期が大きくなる傾向がみられた(図-2)。

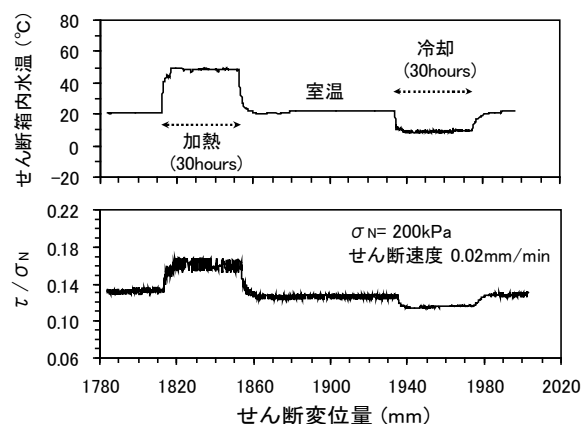


図-1 Ca型ベントナイトの残留強度の温度依存性

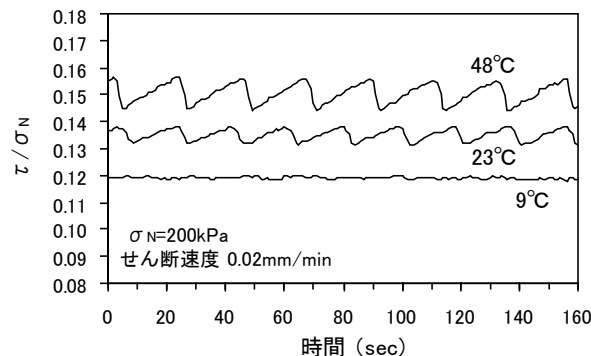


図-2 残留せん断状態において高温時に顕著となるスティックスリップ挙動 (Ca型ベントナイト)

図-3は、せん断速度0.02mm/min、垂直応力200kPa

で長期間に渡り冷却を行った結果である。一定温度で長期に渡り冷却を継続したケースと、長期間かけて緩慢に温度を変化させたケースの実験を行った。せん断開始から終了までの試験時間は、約6ヶ月間に渡っているが、大変位を経ても、 τ/σ_N が僅かずつ漸減傾向を示した。回転せん断に伴い、 τ/σ_N が360°周期で変動する試験機の機構上の特性も認められるが、大局的なせん断挙動に着目すると、せん断強度は温度に追従して変化し、低温時ほど強度低下を示す挙動が確認された。一定温度で18日間冷却させたケースでは、冷却期間中 τ/σ_N の低下が持続することが確認された。また、外部水槽の温度を6~24℃の範囲で1℃/日の緩やかな速度で低下・上昇させたケースでは、温度低下に伴ってせん断応力が序々に低下し、温度上昇により序々に強度回復した。ここでも、 τ/σ_N の微変動（スティック・スリップ現象）が確認され、低温になるほど同現象が消失に向かい、変動の振幅が小さくなる挙動が認められた。

このような残留強度の温度依存性を約5℃～室温の条件下において、粘土鉱物組成、粒度分布、コンシステンシー特性の異なる計23の土試料について検証を進めてきた。その結果、スメクタイトに富む粘土ほど、温度低下に伴う強度低下率が大きいことが明らかとなってきた。一方、スメクタイト以外の粘土鉱物を主体とする粘性土や砂質土には顕著な温度依存性は確認されなかった。また、低温時の強度低下はせん断速度にも依存しており、0.1mm/min以下の緩速条件で顕著である。それ以上のせん断速度では温度低下に伴い強度低下する特性はみられなくなることもわかってきた。

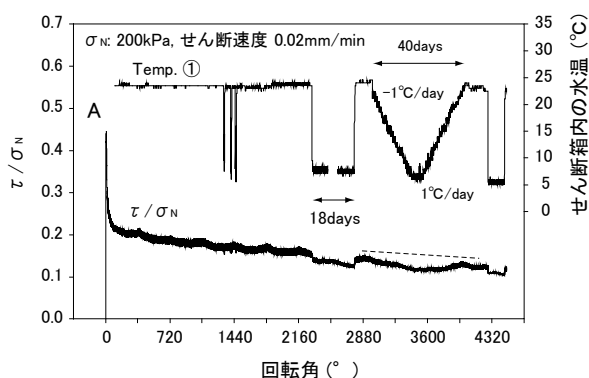


図-3 長期の冷却実験 (Ca 型ベントナイト)

2.2. 不攪乱すべり面試料を用いた検証

新潟県上越市の伏野地すべり地から採取したスメクタイトを含んだすべり面試料を用いて、せん断強度の温度依存性を直接検証した。ボーリングコアのすべり面試料を成形し、繰り返し一面せん断試験を行った。垂直応力 25kPa、せん断速度 0.05 mm/min で定常せん断状態を確認し、その後、同一供試体を用いて、垂直

応力 25, 50, 75, 100 kPa の順に、せん断速度 0.005 mm/min 下でせん断中に冷却実験を行った。各垂直圧下で約200分冷却を行った結果、冷却中にせん断強度が低下する挙動がみられ、特に垂直圧が大きいほど、強度の低下幅も大きく、せん断抵抗角に影響を及ぼすことが判明した。室温の25℃では、8.93°、冷却時（水槽の温度9℃）では、7.71°と、約1°強の有意な低下が認められた。

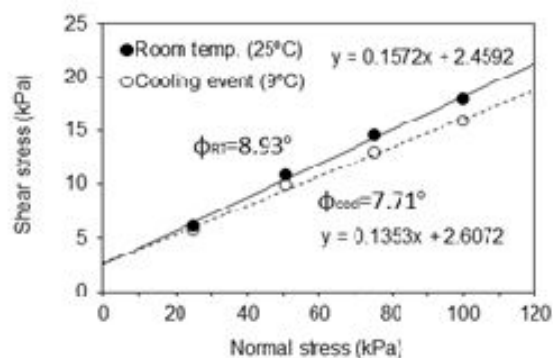


図-4 伏野地区のすべり面強度に及ぼす温度の影響

温度低下によりせん断変位が開始する可能性を検証するため、せん断応力を制御したクリープ実験も行った。垂直圧 100 kPa の条件で、定常せん断状態を確認後、せん断強度 (14.5 kPa) よりもわずかに小さなレベルでせん断応力 (13.7 kPa) を停止状態で一定に保ち、温度を低下させた (図-5)。冷却開始後、せん断変位が徐々進行・加速し、約2時間冷却を継続している間、最大0.01mm/minの低速で変位が継続した。温度を室温に戻すと減速し、最終的にせん断変位が停止した。同じような行程を3回繰り返し、その再現性を確認した。

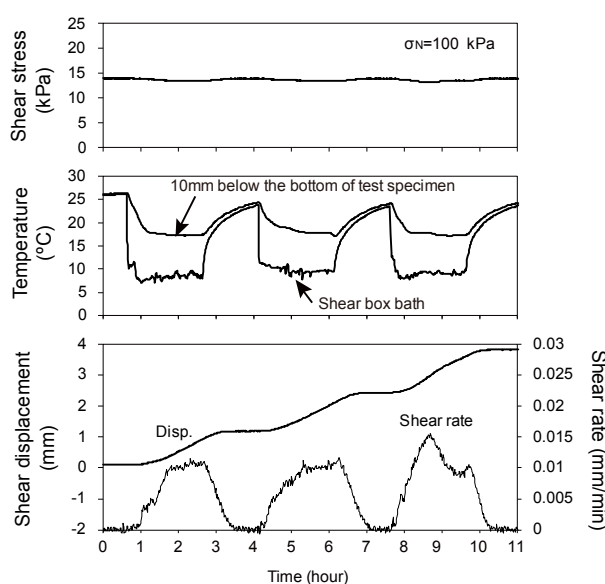


図-5 伏野地区のすべり面試料によるクリープ実験

3. 粘土の残留強度特性に及ぼす水質の影響

海成泥岩の分布域で発生する地すべりの研究の一環で、英国やイタリアの研究者により、ベントナイトの残留強度特性に及ぼす間隙水の化学的性質の影響が精力的に調べられている (Moore, 1991; Di Maio and Fenellif, 1994; Moore and Brunnsden, 1996; Di Maio and Scaringi and Vassallo, 2014; Di Maio et al., 2016)。Tiwarei et al. (2005) も新潟県の泥岩地帯の地すべり粘土を用いて、海水や蒸留水を用いて調整した粘土の残留強度特性を調べている。いずれの結果から、間隙水の塩濃度が希釈されるとせん断強度が低下することが明らかとなっている。Di Maio et al. (2016)は、塩濃度の希釈により、劇的な残留せん断抵抗角の低下を起こすことを報告している。つまり、間隙水中の溶存イオンの溶脱が進むと、地すべりの発生に影響を及ぼす可能性がある。

4. まとめ

地すべりの発生機構は、多くの場合、土質力学の有効応力の概念で説明される。地盤内の間隙水圧は、降雨や融雪イベントに呼応して上昇・下降を繰り返す。すべり面に作用する有効応力が低下するとせん断強度が低下し、地すべりの発生を誘発する。地すべりの移動(変位)と地下水位の上昇の明瞭な関係が観測されている事例も多い。多くの現場で、地すべりが移動開始するタイミングの臨界水位の把握に努力が払われており、対策工を計画する上での基礎となる重要な観測データが得られている。

一方、先に指摘したように、誘因が判然としない事例も存在する。特に水を含んだスメクタイトのレオロジーや土質特性は、温度や間隙水の化学的性質といった要因にも敏感に反応する。そのため、地盤環境の変動因子として、地温や間隙水の性質なども地盤強度を低下させる要因となり得る。地温は一般的には深度10m以浅で緩やかに季節変動を起こすことから、浅い地すべりの安定性を議論する場合に問題となりそうである。間隙水圧の変動のように突発的な変動は起こさないことから、地すべりの積極的な誘因として作用するというよりは、寒候期に長期に渡って地すべりの発生ポテンシャルを上昇させる効果をもたらす可能性がある。また、地温は、地盤表層と深部でタイムラグを生じながら季節変動する(図-6)。例えば、深度2mと6mでは、すべり面の温度の高低が逆転する時期がある。地すべり地のすべり面は、周縁部の地表から～底面まで三次元的な形状を有しており、地温の季節変動を受ける箇所は、大規模な地すべりも少なからず周縁部に存在する。誘因の判然としない地すべりでは、そのような視点から地すべりの安定性を考えていくと、地すべり規模や三次元的なすべり面形状に応じて不安定しやすい時期を議論できるかもしれない。

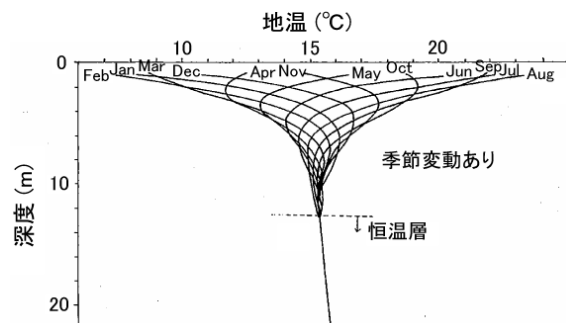


図-6 地温の年変動の例 (竹内, 1996)

一方、間隙水の化学特性に関しては、動態との関係に注目して計測事例も少なく、例えば、調査ボーリング孔内の水質がどのように長期変動するのか観測した事例も少ない。特に、すべり面粘土の間隙水のイオン濃度がどれくらいのスピードで変化し、土質強度に影響していくのか予想がつかない。風化した海成泥岩などは、降雨や融雪水などの天水の影響で地盤中の溶存イオンが徐々に溶脱されていくことは容易に予想できる。土質強度が長期的に低下(劣化)していくことは十分考えられ、初生的な地すべりの発生機構を考える上で考慮すべき点かもしれない。

新潟県の東頸城地方は活褶曲帯として知られ、高塩濃度の深層地下水系が分布することが知られている。地すべりの発生場や地すべりの動態に影響している可能性も考えられている(佐藤, 2014)。毎年同じ時期に再活動する地すべりの要因として、この深層水と天水との相互作用を力学的な側面や化学的な側面から考えることができるのか研究を進める必要がある。

最後に、地すべり調査でその誘因が判然としない場合には、すべり面粘土を構成する粘土鉱物がスメクタイトであるかどうかの確認を推奨したい。また、地温の季節変動特性にも着目した調査なども是非検討して頂きたい。

<引用文献> 佐藤壽則ほか (2004):地すべり, 41(1), 37-42; 柴崎達也・山崎孝成 (2010): 日本地すべり学会誌, 47(5), 255-264; Moore, R. (1991) Geotechnique, 41(1), 35-47; Di Maio, C., and Fenellif, G. B. (1994), Geotechnique, 44(2), 217-226; Moore, R., and Brunnsden, D. (1996) Geotechnique, 46(2), 259-278; Di Maio, C. (1996) Geotechnique, 46(4), 695-707; Di Maio, C. et al. (2014) Landslides, 12(4), 657-667; Di Maio, C., and Scaringi G. (2016): Engineering Geology, 200, 1-9; Tiwarei, B., et al. (2005) J Geotech Geoenviron, 131(12), 1445-1456; 竹内篤雄 (1996): 温度測定による流動地下水調査法; 佐藤 壽則 (2014): 新潟大学大学院自然科学研究科博士論文

豪雪地域の地すべりに及ぼす積雪荷重の影響

Effects of snow load on landslide movements in the area with heavy snowfall

岡本 隆 (国立研究開発法人 森林総合研究所東北支所)

Takashi OKAMOTO (FFPRI Tohoku)

キーワード：地すべり，積雪荷重，安定解析，観測

Keywords: landslide, snow load, stability analysis, monitoring

1. はじめに

東北地方の日本海側や北陸地方などの山間部は冬季の積雪深が数メートルに及ぶ世界的にも有数の豪雪地域である。これらの地域では3月から5月の融雪期に大量の融雪水が地盤内部に継続的に供給され、地すべりが頻発することが知られている。一方で、豪雪地域の地すべりは、融雪期以外の積雪期にも多様な挙動を示すことも指摘される。例えば、佐藤ほか（2004）は新潟県内の第三紀層地すべりの観測データを取りまとめ、積雪期の地すべり運動パターンは5タイプに分類されることを示し、積雪初期や厳冬期に活発化する事例もあることを示している。

森林総合研究所では1987年より、新潟県上越市の東頸城丘陵内にある伏野（ぶすの）地すべり地において地すべり移動・地下水・気象に関する継続的な観測をおこなっ

ている（例えば、松浦ほか，1992）。当該地すべりは、積雪初期に活発な移動を呈し、積雪増加とともに収束する特異な挙動を示す特徴を有する。

ここでは、伏野地すべりの積雪期の挙動について、積雪現象との関係を示しながら、積雪荷重が地すべり活動に与える影響について紹介する。

2. 新潟県伏野地すべり地

伏野地すべりは、新潟県上越市の東頸城丘陵内の標高550～650mに位置する。地すべり地付設の気象露場における26年間（1988～2013年）の冬季最大積雪深は最小153cm、最大539cm、平均379cmである。地すべりは、長さ約300m、幅50～70m、斜面勾配5～15度の緩やかで細長い形状をなす。過去の大規模地すべりによっ

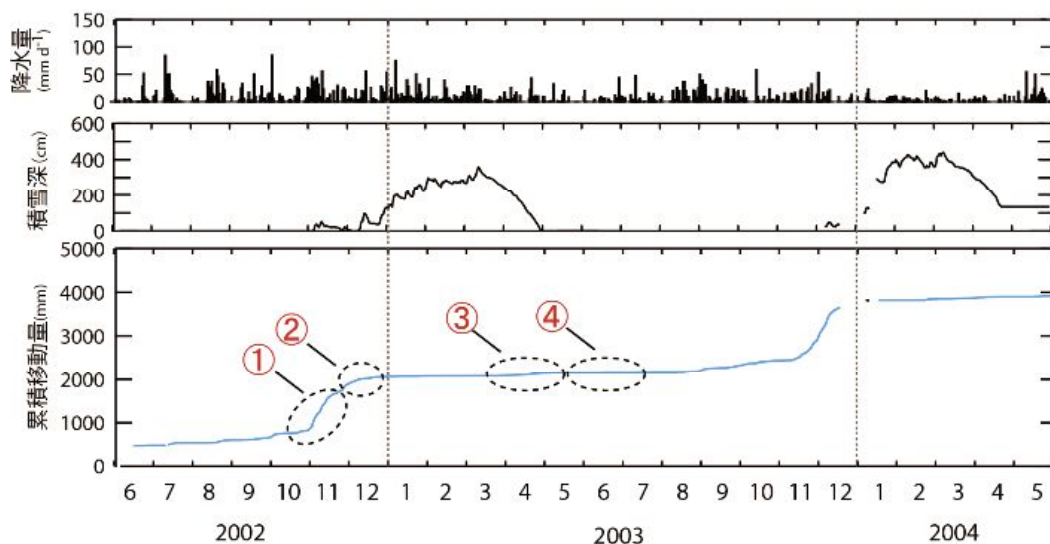


図1 伏野地すべりにおける移動量の経時変化（中部ブロック末端部E4、2002.6～2004.5）

- ①地すべり活動の活発化，②積雪層の発達と共に移動速度が低下，③融雪期の緩慢な移動，④消雪後の活動の鈍化

て樋状の凹部に崩落した崖錐堆積物が再び移動する、典型的な再活動型地すべりの様相を示す。地質は第三系の椎谷・寺泊層および西山層に属する黒色泥岩を中心に、一部に凝灰岩を挟在し、浅層部は強い風化を受けて構造がぜい弱化している。すべり面は 4～7m と浅く、いわゆる浅層地すべりに該当する。

3. 伏野地すべりの移動特性

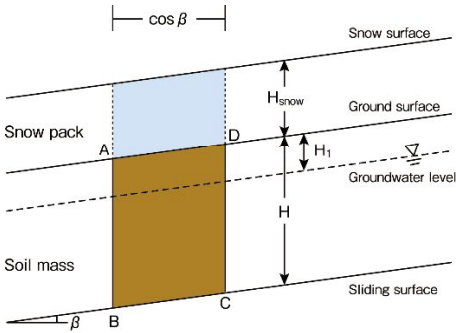
観測例として、伏野地すべり中部ブロック末端部 (E4) における 2003～2004 年の 2 年間の地中変位量を図 1 に示す。同地すべりの季節変動は次のように特徴づけられる (岡本ほか, 2008)。

- ① 秋季に地すべり活動が活発化し、12 月上旬の積雪初期にかけて変位速度はピークに達する。
- ② 積雪層が発達すると変位速度が急速に低下し、移動が沈静化する。
- ③ 融雪期には緩慢な移動はあるが融雪量に比してその量は小さい。
- ④ 消雪後から夏季にかけては強度の高い降雨に対して応答はあるものの、全体的な活動は鈍い。

ここではとくに②、③の積雪層の発達による地すべり活動の沈静化の要因について議論する。

4. 地すべりの安定性に及ぼす積雪荷重の影響

伏野地すべりでは、積雪深が 1m 程度に発達するとそれまでの移動速度が急減し、ほぼ停止状態になる。また大量の融雪水が供給され地下水位が上昇する融雪期にも顕著な移動が認められない。このような特異な挙動には積雪荷重が関与していると考えられる。すなわち積雪荷重が地すべり土塊に作用することで、すべり面に作用する垂直応力 (有効応力) を増加させ、せん断抵抗力を上昇させる考え方である。ただし積雪荷重は地すべりのせん断応力 (推進力) も同時に増加させることになる。そこで、積雪荷重が地すべりの安定性に与える影響を評価するため、図 2 に示すような二次元の半無限長斜面に積雪層を載荷させたモデルを構築して安定解析をおこなった。なお内部摩擦角 ϕ' や粘着力 c などの解析パラメータは現地土質試験結果を用いている。他の解析の詳細は岡本ほか (2008) を参



$$F_s = \frac{(\sigma - u) \tan \phi' + c'}{\tau}$$
$$\sigma = \{\gamma_t H_1 + \gamma_{sat} (H - H_1) + \gamma_{snow} H_{snow}\} \cos^2 \beta$$
$$u = \gamma_w (H - H_1) \cos^2 \beta$$
$$\tau = \{\gamma_t H_1 + \gamma_{sat} (H - H_1) + \gamma_{snow} H_{snow}\} \cos \beta \sin \beta$$

パラメータ	記号	単位	数値
内部摩擦角	ϕ'	°	8.0
粘着力	c'	kPa	5.0
土塊の湿潤単位体積重量	γ_t	kN/m ³	19.5
土塊の飽和単位体積重量	γ_{sat}	kN/m ³	20.1
積雪層の単位体積重量	γ_{snow}	kN/m ³	3.92
水の単位体積重量	γ_w	kN/m ³	9.81
すべり面深度	H	m	6.25
地下水面までの深度	H ₁	m	0.50
すべり面勾配	β	°	7.0

図 2 積雪層を考慮した半無限長斜面の安定解析モデル

照戴きたい。
すべり面勾配を 5, 20, 40 度に設定したときの積雪深増加時の斜面安全率を図 3 (a) に示す。勾配が 5 度と小さければ積雪深の増加により安全率は上昇する。これは積雪荷重が垂直応力 (有効応力) の増分側に強く配分されるためである。しかしすべり面勾配が大きくなると積雪荷重の配分は徐々にせん断応力側に転じるため安全率の上昇は鈍化し、勾配 40 度では積雪深増加時に安全率が低下した。次にすべり面勾配を伏野地すべりの 7 度に固定してから内部摩擦角を 3, 8, 15 度に設定し、同様に斜面安全率を求めた (図 3 (b))。内部摩擦角が 3 度と小さいと、積雪深の増加により安全率は低下し、内部摩擦角 8, 15 度では逆に安全率が上昇した。これらの結果から、積雪荷重が地すべりの安定に及ぼす影響はすべり面の勾配と内部摩擦角に依存することが明らかとなった。ただしこれらの

数値は半無限長斜面での計算結果であり、安定—不安定の閾値は地すべりによって多様であると考えられる。

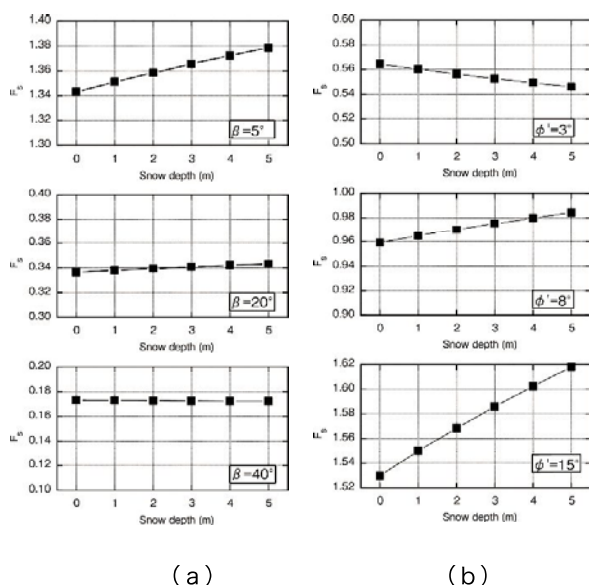


図3 積雪深と斜面安全率の関係

(a) はすべり面勾配 (β) を変化させた場合

(b) はすべり面の内部摩擦角 (ϕ') を変化させた場合の結果

4. まとめと今後の課題

積雪期の地すべり活動は、融雪期のみならず多様な様相を示す。このうち積雪の増加にともなって移動速度が低下する地すべりの要因は積雪荷重によるすべり面の垂直応力(有効応力)、せん断抵抗力の増加であると考えられた。とくにすべり面勾配が小さく、すべり面の内部摩擦角が大きい条件下では、積雪荷重による抑止効果は強くなることが示唆された。

豪雪地帯の地すべりは他にも特異な挙動が様々に認められる。上述した①秋季から積雪初期にかけて活動が活発化する要因については、地温低下による地すべり粘土の強度低下が指摘されており (Shibasaki *et al.*, 2015), ④の消雪後から夏季にかけての不活発状態の要因については、長期的な積雪載荷による土塊の圧縮、すべり面強度の回復の可能性が指摘されている(岡本ほか, 2015)。また、積雪荷重が地すべりの水平土圧の増加を促す指摘や積雪荷重による表層地盤の圧縮と透水性の低下 (Osawa *et al.*, 2015) の指摘もなされている。

積雪地域の地すべりは観測が技術的に困難なことから、現象についての共有認識も進んでいない一面がある。今後は研究の推進に合わせてその共有認識を高めるべく啓蒙を進めることも必要であろう。

なお本研究は、関東森林管理局および上越森林管理署との共同研究の成果の一部であり、試験地における機器設置、維持管理に多くのご配慮を戴いた。ここに記して御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 松浦純生・落合博貴・竹内美次・梁瀬秀雄 (1992): 豪雪地帯における地すべり自動観測システムの開発, 地すべり, Vol.29, No.3, pp.18-26.
- 2) 岡本隆・松浦純生・浅野志穂 (2008): 積雪地域における浅層地すべりの変形機構, 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.6, pp.20-30.
- 3) 岡本隆・松浦純生・阿部和時 (2015): 積雪期における地すべり土塊の鉛直変化計測, 日本地すべり学会誌, Vol.52, No.1, pp.21-28.
- 4) Osawa, H., Shibasaki, T., Matsuura, S., Okamoto, T. (2015): Effects of snow load on water infiltration in the ground surface layer of a landslide, Asian Regional Conference of IAEG, 10, Tpl-24.
- 5) 佐藤壽則・白石秀一・伊藤俊方 (2004): 積雪期における新潟県内の第三紀層地すべりの運動特性, 日本地すべり学会誌, Vol.41, No.1, pp.37-42.
- 6) Shibasaki, T., Matsuura, S., Okamoto, T. (2015): Temperature-dependent residual shear strength characteristics of smectite-rich landslide soils, European Geosciences Union, EGU General Assembly, 17, 8737.

平成28年度
日本地すべり学会東北支部シンポジウム

【積雪～融雪時期の融雪水
浸透における地下水位への
影響についての一考察】

平成28年4月25日(月)

新和設計株式会社・細谷 健介

【研究目的(当初)】
【研究対象地】
○富山県 国道41号沿線(神通峡)



【研究目的(当初)】

融雪水量を推定する上での最適な推定手法
を検討し、降雨量と同様に融雪量からの道路
管理手法(通行規制判断)を検討する。

○融雪水量換算手法の例

積算暖度法、雪尺法、ライシメーター法等

事例収集、データ解析を進めていく過程にお
いて、2つの疑問が生じた(当初の研究目的
から外れます)。

① 融雪期の斜面災害事例

No.	災害発生場所	発生年月日	時間	災害の種類	発生規模	原因	対策工	備考
1		S37 1982.2.2	不明	土砂崩壊				
2		S56 1981.3.15	4時20分頃	土砂崩壊				
3		S4 1992.2.17	不明	落石・崩壊				
4		S56 1981.3.27	不明	土砂崩壊				
5		S60 1985.2.13	不明	土砂崩壊				
6		S43 1981.4	不明	土砂崩壊				
7		H18 2006.1.15	10時10分頃	土砂崩壊				
8		H22 2010.2.9	不明	斜面崩落 崩壊・陥没				

【疑問1】

- なぜ発生時刻で「不明」が多いのか？
- 判明しているものは深夜～早朝で気温が低い・凍結する時間帯に発生しているのはなぜか？

① 融雪期の斜面災害事例

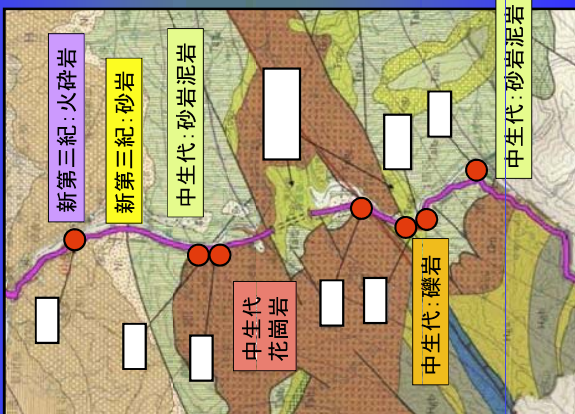
【疑問1】

物流の要：国道41号
でなぜ発生時刻が
「不明」・「深夜」
「不明」が多いのか？

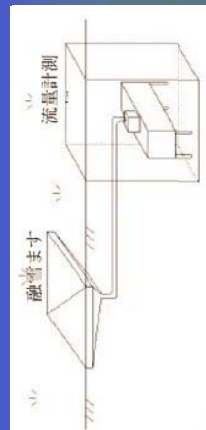


不明は「**未知**」だから？

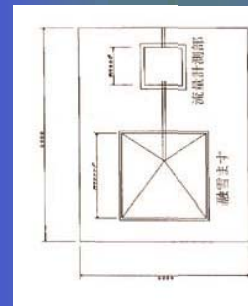
融雪期の斜面災害は
「**未知**」に起こり易い？



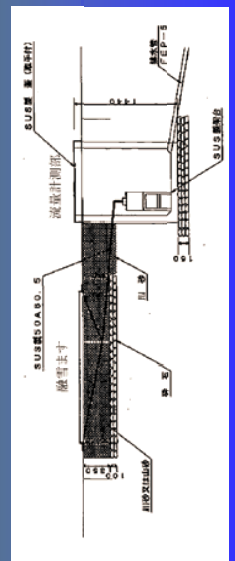
② 融雪水量と地下水位の測定事例 ～ライシメーターの設置・測定～



【平面図】



【断面図】

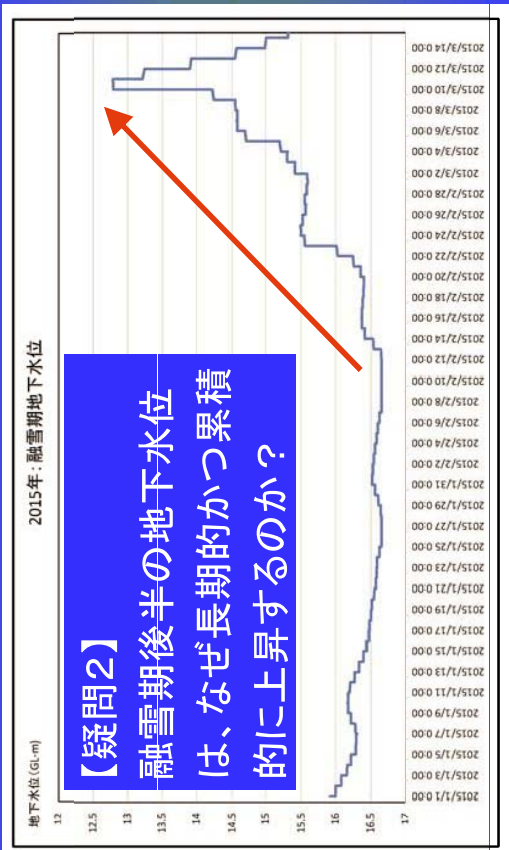


【断面図】

① 融雪期の斜面災害事例

【疑問2】

融雪期後半の地下水位
は、なぜ長期的かつ累積
的に上昇するのか？



② 融雪水量と地下水位の測定事例 ～ライシメーターの設置・測定～



②融雪水量と地下水位の測定事例 ～ライシメーターの設置・測定～

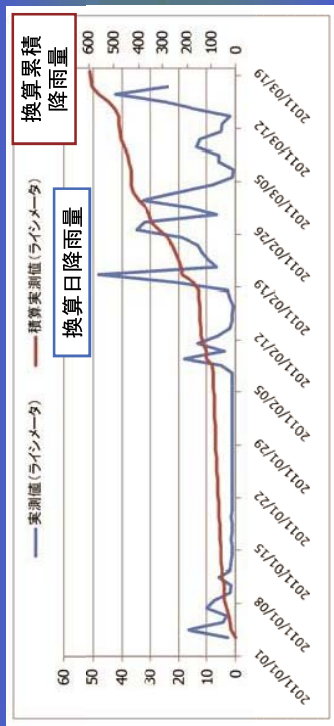


近傍の
既設地下水位
観測孔

【盛土斜面】
(通行規制検討用)

9

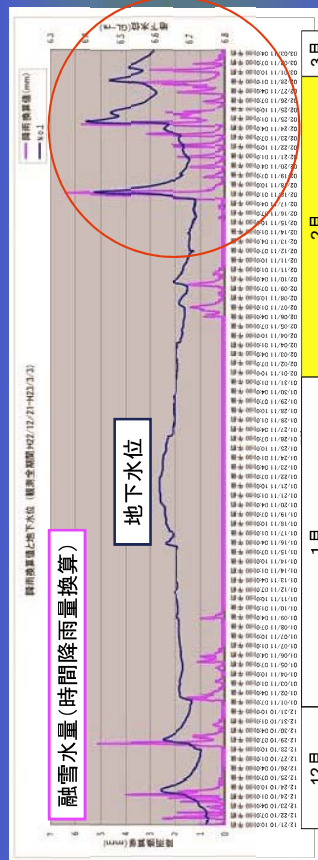
②融雪水量と地下水位の測定事例 ～ライシメーターの設置・測定～



ライシメーターの測定結果では、低温の日でも融雪水は途切れることなく地表に供給されていることが判明した。

10

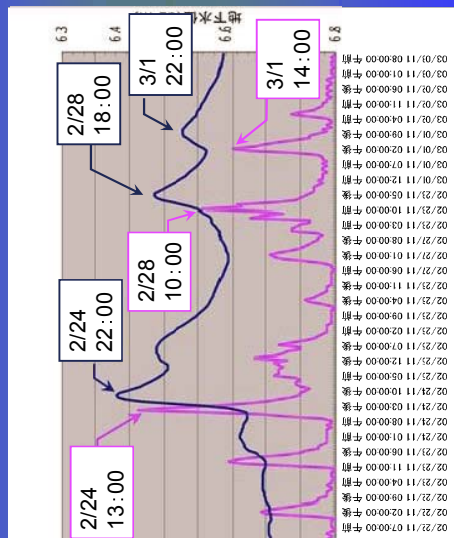
②融雪水量と地下水位の測定事例 ～ライシメーターの設置・測定～



融雪が進行する2月以降で水位上昇傾向が確認される。(12～1月は目立って上昇していない?)

11

②融雪水量と地下水位の測定事例 ～ライシメーターの設置・測定～

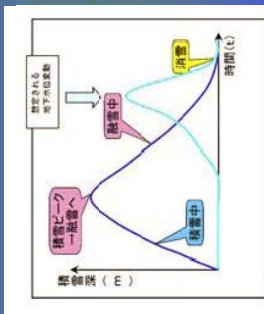
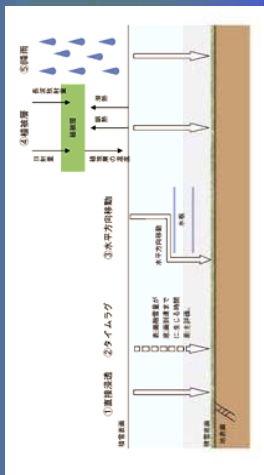


- 融雪水量のピークと地下水位のピークにズレがある(時間差: 7～8時間程度)
- 融雪水量のピークは日中、地下水位のピークは夜半～深夜に観測される。

12

②融雪水量と地下水位の測定事例

ピークのズレは、①融雪水の降下→②地表面到達→③地中へ浸透→④地下水位へ合流、までの経過時間を示している。



融雪期では地下水位は**夜半～深夜**にピークを迎える。ならば斜面安定度も夜半～深夜に下がるのではないか？→未明災害の要因？

13

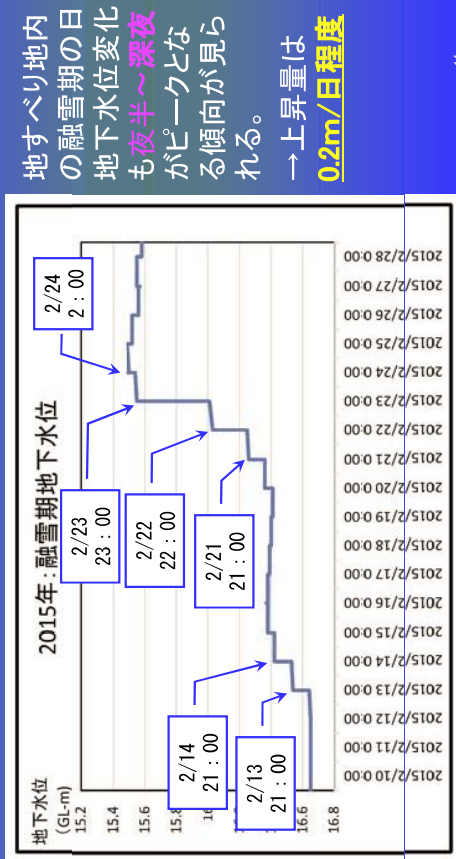
③地すべり地内の地下水位 (山形県内の地すべり地の経時データ)



融雪期は途切れることなく長期的かつ恒常的に斜面内に浸透水が供給される結果、融雪期の累積的な水位上昇(0.2m/日程度)として観測されるものと推定される(飽和状態に少量ずつ過剰供給する状態)。

15

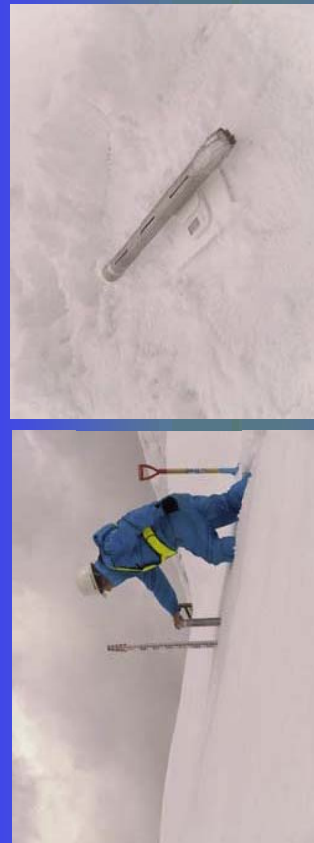
③地すべり地内の地下水位 (山形県内の地すべり地の経時データ)



地すべり地内の融雪期の地下水位変化も**夜半～深夜**がピークとなる傾向が見られる。
→上昇量は**0.2m/日程度**

14

④融雪期の追加効果～雪密度～

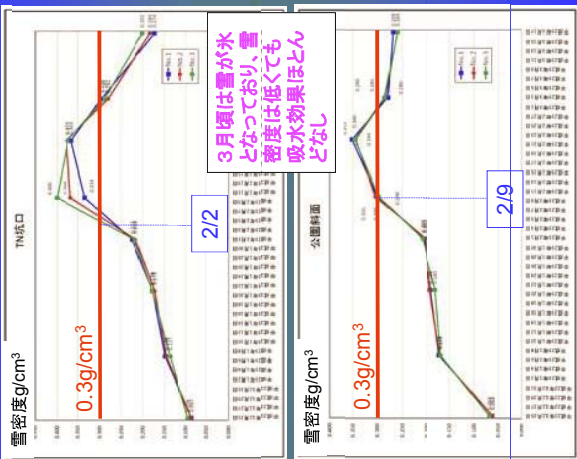


16

④融雪期の追加効果～追い打ち降雨～

雪密度が低い降雪期では積雪内で降雨水が吸収され、降雨水の一部が地表まで届かない(地下水上昇をむしろ抑制する)。

「ザラメ雪(雪密度≒0.3～0.4g/cm³)」の状態から降雨水が地表に届き、かつ降雨水に融雪水が加わるため、降雨量以上の浸透水が供給される。

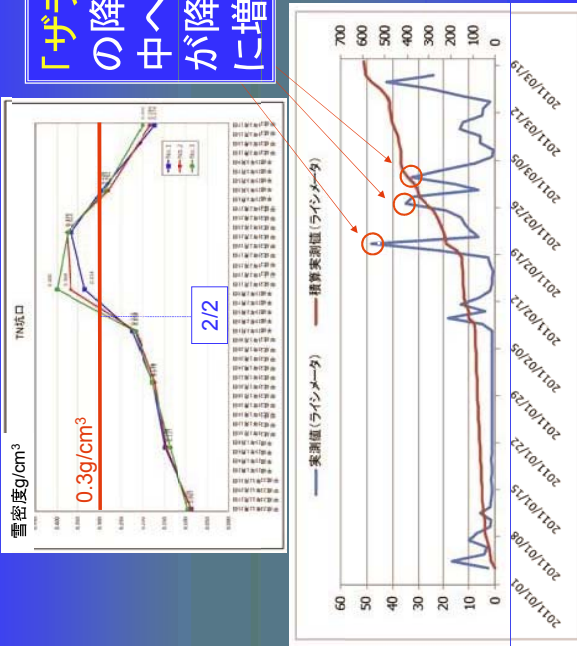


【まとめ】

- 融雪期の地下水位は夜半～深夜にピークを迎える可能性が高いため、日当りの斜面安定度は深夜が最も低くなる(未明の斜面災害発生の要因)。
- 融雪期では恒常的に0.2cm/日程度の水位上昇をもたらす融雪水量の供給が想定される(累積的水位上昇の要因)。
- 降雪期前期では、降雨水が積雪内で吸収されるため、地表まで降雨水のすべてが届かず、むしろ地下水位の上昇が抑制される状態にある。
- 降雪期後半: 融雪期のザラメ雪では「降雨水」がダイレクトに地表に届き、かつ融雪水が加わるため、地下水位に大きな追い打ち効果をもたらす。

④融雪期の追加効果～追い打ち降雨～

「ザラメ雪」時期の降雨により地中への浸透水が降雨量以上に増大



積雪期前に活発化する地すべりの要因について

Possible factor affecting landslide activation before the snow season

大村 泰*, 伊藤和広 (奥山ボーリング(株)), 田村圭司 (国土交通省 東北地方整備局 新庄河川事務所)

渡部直喜 (新潟大学 災害・復興科学研究所), 浅井和由 ((株)地球科学研究所)

Yasushi OMURA*, Kazuhiro ITO (Okuyama Boring Co., Ltd.)

Keiji TAMURA (Shinjo Office of River MLIT), Naoki WATANABE (Niigata University)

Kazuyoshi ASAI (Geo-Science Laboratory CO., Ltd.)

キーワード: 地すべり, 地下水水質, 地下水年代, 電気伝導度

Keyword: Landslide, groundwater quality, residence time, electrical conductivity

1. はじめに

地すべりが豪雨時や融雪時に発生するという報告は多い。これらの地すべりは、降雨や融雪水が地下水として涵養され、斜面中の地下水位が上昇することによる不安定化に起因すると考えられる。一方、積雪期前や積雪初期にあたる10～12月頃、豪雨や目立った融雪の見られない時期に地すべり変動が活発化したという事例も存在する。

新潟県の第三紀層地すべりについて、佐藤ほか(2004)¹⁾は積雪期前や積雪初期の地すべり運動特性を考察している。また、渡部ほか(2009)²⁾は豪雨や融雪時以外に地すべり兆候が現れる場合について、地すべり地の地下深部から供給される深層地下水(高塩分濃度の地下水)が地すべりに寄与していることを報告している。

山形県志津地すべりでは平成17年度から地すべり動態観測が行われており、ここでも積雪期前にあたる9～10月頃に地すべり変動の活発化するデータが捉えられている。また、当該地すべりの水質調査から、一部に高塩分濃度(以下、NaCl型)の地下水が認められている。

筆者らは、志津地すべりの積雪期前に活発化する地すべり変動とNaCl型地下水との関連性を把握することを目的として、地下水の水質や年代、電気伝導度などの調査を平成24年～平成26年まで実施してきた。その結果、一部の調査孔において、NaCl型地下水は降雨や融雪水の影響が少ない8～10月に浅い深度まで上昇してくること、NaCl型地下水の上昇時期と地すべり変動が活発化する時期(9～10月頃)は概ね一致することが判明した。

2. 志津地すべりの概要

志津地すべりは山形県の中央部、月山(標高1,984m)の南側山麓に位置し、指定面積154haを有する国土交通省所管の地すべり防止区域である(図-1)。

これまでの地すべり調査から、最大地すべり層厚は100m以上、地すべり移動土塊は主に月山火山噴出物と想定されている。地すべり地内には志津温泉の源泉掘削地点が存在しており、ここから高濃度のNaCl型地下水が湧出している。

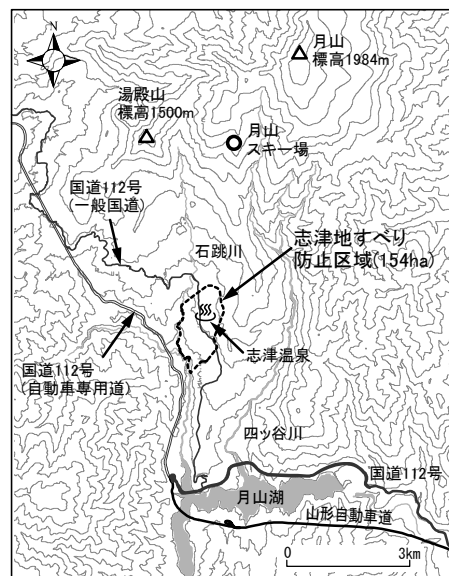


図-1 志津地すべり位置図

3. 調査方法

NaCl型地下水が確認されていた調査孔(BV19-G3)について、平成24年8月から平成26年11月までに特定深度(深度7m)から採水した地下水の水質および年代調査を4回実施した。地下水の年代は、地下水に溶存しているSF₆(六フッ化硫黄)ガスの濃度から推定した。また、平成26年5月から平成26年11月まで、電気伝導度検層(以下、EC検層)を月1回実施した。調査孔(BV19-G3)では全ストレーナによる地下水位観測とパイプ歪計観測が平成19年12月から実施されている。この観測データと本調査結果を比較し、積雪期前に活発化する地すべり変動とNaCl型地下水の関係を考察した。

4. 調査結果

4.1 地下水の水質と年代

調査孔(BV19-G3)の地下水の水質および年代調査結果を地下水位変動図と共にまとめた(図-2)。平成24年8月23日に採水された地下水は、地下水年代が50年以上となり、涵養期間が長く古い年代のものと推定された。水質はNaCl型であった。他の時期の地下水年代は10年～11年となり、涵養期間が短く若い年代と推定された。

これらの水質はいずれも CaHCO_3 型であった。

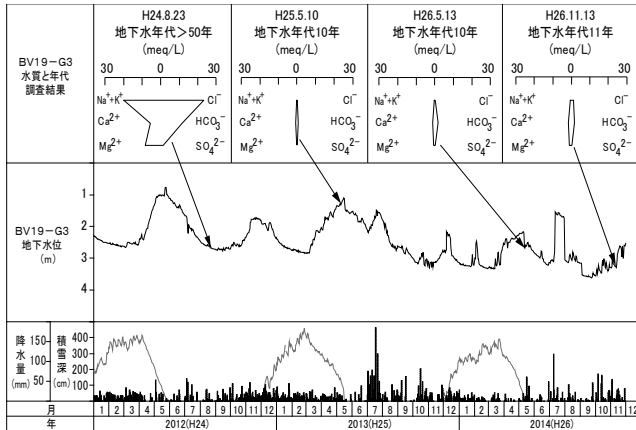


図 - 2 地下水の水質・年代調査結果

4.2 電気伝導度検層

平成 26 年 5 月から 11 月まで、7 回実施した EC 検層結果を図 - 3 に示す。なお、調査孔 (BV19-G3) は地すべり変動によって深度 12m 以深で変形しているため、計測は深度 11.5m までとした。EC 検層結果を時系列的に比較すると、9 月の測定値は深度 9.0m~11.5m で最高値となり、10 月の測定値についても深度 9.0m~11.5m で 9 月に次ぐ高い数値を示している。

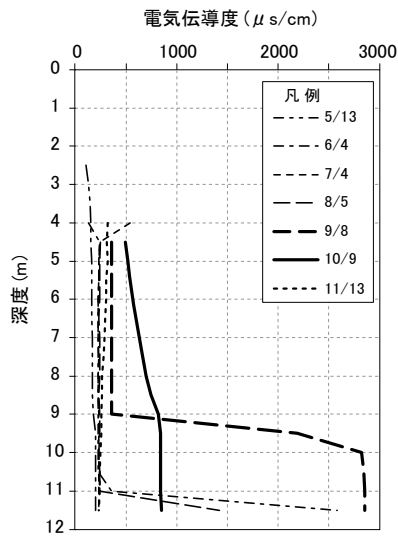


図 - 3 EC 検層結果 (平成 26 年 5 月~11 月)

5. 考察

調査孔 (BV19-G3) で観測された地下水位、パイプ歪計の経年データを図 - 4 に示した。これによると、深度 11 m の歪ゲージは平成 19 年 12 月の観測開始以降、平成 22 年 10 月まで断続的に地すべり変動を捉えている。地すべり変動はいずれも積雪前の 9~10 月頃に活発化し、地下水位が最も高くなる 5 月頃の融雪時期に減衰して安定化する傾向が認められる。

この地すべり変動と地下水位、および今回の調査結果から次のことが示唆される。

① 平成 24 年 8 月の採水では、NaCl 型で古い年代の地下

水が確認された。また、EC 検層では平成 26 年 9 月と 10 月に高い電気伝導度が計測されたことから、NaCl 型地下水は降雨や融雪水の少ない 8 月~10 月頃に浅い深度まで上昇してきていると推察される。

- ② NaCl 型地下水の上昇する時期は、地すべり変動の活発化する 9 月~10 月頃と概ね一致していることから、NaCl 型地下水の上昇は志津地区の地すべり変動に影響している可能性がある。
- ③ 8~10 月以外の時期に確認された CaHCO_3 型で若い年代の地下水は、地下水位の高い時期に該当しており、降雨や融雪水が地下水として涵養されているものと考えられる。

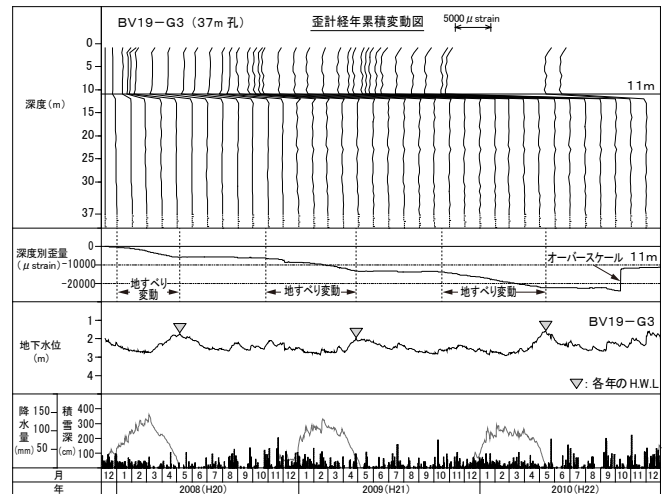


図 - 4 調査孔 (BV19-G3) における地下水位・パイプ歪計の経年変動図 (新庄河川事務所 (2010) ³⁾ を修正・加筆)

6. おわりに

本調査は、小規模な地すべりブロックに位置する調査孔を対象に実施したものである。志津地すべりはすべり面深度が最大 100m を超える大規模な地すべりブロックも有している。今後は、深層にすべり面を有する地点での水質および年代調査、EC 検層などのデータを蓄積していくことによって、NaCl 型地下水と地すべり変動との関係を究明していきたい。

なお、本稿は「第 54 回日本地すべり学会研究発表会講演集」に投稿した内容を再掲したものである。発表ではこの他の調査結果も交えて話題提供する。

引用文献

- 1) 佐藤壽則・白石秀一・伊藤俊方 (2004) : 積雪期における新潟県内の第三紀層地すべりの運動特性, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 1, pp. 37-42.
- 2) 渡部直喜・佐藤壽則・古谷元 (2009) : 新潟地域の大規模地すべりと異常高圧熱水系, 地学雑誌, Vol. 118, No. 3, pp. 543-563.
- 3) 新庄河川事務所 (2010) : 平成 22 年度月山地すべり観測調査報告書(1/2) 本編, p. 5-144.

- 公益社団法人日本地すべり学会東北支部
平成 28 年度シンポジウム
「積雪・融雪と地すべり
～その不思議な挙動の解明と危険度予測を目指して～」
- 編集・発行
公益社団法人日本地すべり学会東北支部
<http://japan.landslide-soc.org/branch/tohoku/>
- 発行日
平成 28（2016）年 4 月 25 日
- 日時
平成 28 年 4 月 25 日（月） 14:30～17:30
- 場所
仙台市戦災復興記念館記念ホール
仙台市青葉区大町 2-21-1 TEL 022-263-6931
- CPD
公益社団法人日本地すべり学会認定
3 時間（認定番号：JLS040）