

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26560190

研究課題名(和文)季節的な地温変動を誘因とする地すべり発生機構の解明

研究課題名(英文) Study on the mechanism of reactivated landslide induced by the seasonal fluctuations in ground temperature

研究代表者

松浦 純生 (Matsuura, Sumio)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：10353856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：晩秋から初冬の寒候期に発生する浅い地すべりの発生誘因として、浅層地温の季節変動が関与する可能性に注目した。新潟県伏野地すべり地にて、すべり面を含んだ不攪乱試料を採取し、せん断強度の温度依存性を確認した。実験の結果、低温環境ほどすべり面強度が低下し、緩速なクリープ変位を誘発することがわかった。また、リングせん断試験機を用いて、全国各地の地すべり地より採取した数多くの粘土を用いて残留強度の温度効果を調べた。スメクタイトに富む粘土ほど温度依存が顕著であることや、せん断面に粒子配向しやすい遅い変位速度条件ほど、低温時の強度低下が起きることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We investigated the effect of seasonal fluctuation in ground temperature on shallow landslides occurring in the cold season from late autumn to early winter. The effect of temperature on shear strength was investigated on undisturbed smectite-rich slip surface soils collected from Busuno landslide, Niigata Prefecture. Test results showed that shear strength decreases with decreasing temperature and slow creep-like displacements can be induced by cooling. Ring shear experiments performed on many slip surface soils also demonstrated that this temperature effect on residual strength is typical for smectite-rich soils and prevail at slow shearing rate conditions in which platy smectite particles are highly oriented along the shear surface.

研究分野：傾斜地保全

キーワード：積雪地帯 再活動型地すべり 地温 スメクタイト リングせん断試験 残留強度 温度効果

1. 研究開始当初の背景

日本有数の地すべり多発地帯として知られる新潟県などでは、融雪期に発生する地すべりの他、晩秋～初冬に移動を開始する地すべりや、厳冬期に移動が活発化する地すべりがある。間隙水圧が上昇する融雪期以外に地すべりが寒候期に発生する要因についてよく分かっていない点も多く、地すべりの発生時期や動態の予測の面で、その機構解明が防災上課題となっている。

このような緩慢な移動を繰り返す再活動型地すべりが多発する地質体として、新第三紀の堆積性軟岩や火山地帯の火山性軟岩の分布地域が挙げられる。これらは、高塑性な膨潤性粘土鉱物(スメクタイト)を地層中に多く含むことを特徴としている。一般的に、地表近くの深度10m以浅の地盤では、地温の季節変動がみられる。柴崎・山崎(2010)の先行研究によると、地すべり地に広く分布する膨潤性粘土鉱物(スメクタイト)の残留強度が温度に依存することが報告されている。そこで、浅い地すべりにみられる寒候期初期の不安定化が、季節的な地温低下に起因しているのではないかとこの研究仮説を持つに至った。膨潤性粘土鉱物の残留強度が温度に依存する本質的なメカニズムについては不明な点も多く、また地すべり地の地温環境がすべり面付近でどのように季節変動するのかその実態も不明である。本研究では、室内実験と野外観測の両面から、その機構検討を試みた。

2. 研究の目的

斜面が不安定化するメカニズムを理解する上で、すべり面のせん断強度が低減する機構の解明が重要となる。多くの地すべりの発生誘因としては、降雨や融雪による地盤内の間隙水圧上昇が大きく影響している。一方で、地温も地盤環境の変動因子となるが、従来、地すべりを誘発する要因として、すべり面の温度環境の変化は注目されたことがなかった。

再活動型地すべりは過去に相当量の移動を経験しており、すべり面を構成する土の残留強度が問題となる。本研究では、毎年晩秋～初冬にかけて地すべり移動が活発化することで知られる新潟県上越市の伏野地すべりを研究対象とし、現地ではボーリング調査を実施してすべり面の試料をサンプリングした。その試料のせん断強度に及ぼす温度の影響を直接検証しようと試みた。

柴崎・山崎(2010)の研究によると、粘土の残留強度の温度依存性が特定の粘土鉱物(スメクタイト)にのみ顕著に認められることや、低速条件で冷却時に強度低下する特性があることがわかっている。本研究では、スメクタイト含有量の異なる日本国内各地の地すべり粘土も多数用いて、温度効果の影響を検討した。また、スメクタイトに富んだ代表的な粘土(ベントナイト)を用いて、様々なせん断速度で残留せん断状態にあるせん断面の詳細な観察を行って、そのメカニズム解明を試みた。

また、地温環境と地すべり動態との因果関係を調べることを目的に、動態観測を行っている地すべり地において野外観測も実施した。調査ボーリング孔内の水温をモニタリングした他、地内で浅層地温の探査を行い、地下水温および地温の季節変動の実態を調査した。

3. 研究の方法

(1) 地すべりの「素因」の解明・・・膨潤性粘土鉱物の残留強度の温度依存メカニズムの解明

国内有数の豪雪地帯、新潟県上越市に位置する伏野地すべりを調査・観測の対象とした。伏野地区は1990年代～2000年代前半にかけて晩秋～初冬の時期に活発な地すべり移動を記録している。寒候期初期のすべり面強度の低下要因として地温の影響を検証するのに適した調査地である。現地から採取したすべり面粘土を用いて、以下の実験を行った。

不攪乱試料を用いたすべり面強度の温度依

存性検証

現地にてボーリング調査を実施し、すべり面試料を不攪乱採取した。すべり面を構成する土の特性（構成する粘土鉱物種、含水比など）を調べるとともに、繰返し一面せん断試験機を用いてすべり面強度の温度効果を検証した。せん断面にすべり面を一致させ、せん断中に温度変化を与えせん断強度に与える温度の影響を調査した。試験時の温度条件は、地温の現地観測結果を参考に設定した。

リングせん断試験による温度制御実験

伏野地区から採取したすべり面粘土の再構成試料を用いてリングせん断試験を実施した。一定の垂直応力を载荷させ、室温下において緩速で排水せん断を行った。残留せん断状態を確認した後に、現地の地温の緩やかな季節変動を再現し、試験供試体に温度変化を与えた。室温から 1 / 日程度の非常に遅いスピードで試験供試体の温度を下降 上昇させ、せん断強度に及ぼす長期的な温度変化の影響を、数か月に及ぶ実験を行い検討した。

また、全国各地から採取した含有する鉱物種やその割合が異なる地すべり粘土について、せん断強度の温度効果を調べた。特に、スメクタイト含有率と温度変化がせん断強度に及ぼす影響度を定量的に議論するため、含有鉱物の定量なども実施した。スメクタイトの残留強度の温度依存メカニズムを検討することを目的に、Ca ベントナイトを用いて、様々なせん断速度で形成されたせん断面を対象に、走査型電子顕微鏡や走査型プローブ顕微鏡を用いて観察を行った。

(2) 地すべりの「誘因」の解明・・・地温変動が地すべり発生に影響する可能性の現地実証

伏野地区にて、地すべりの動態および地温の観測を行った。地すべり地における季節的な地温変動の実態把握を目的に、ボーリング孔内に深度方向に数点の温度記録計を設置し、孔内温度の季節変動を観測した。加えて、定期的にボ

ーリング孔内の温度検層や 1m 深地温探査を実施し、すべり面付近や移動体、その周辺地盤における地温の季節変動特性を明らかにした。

4. 研究の成果

(1) 室内実験の成果

この 3 か年の調査の中で、新潟県上越市の伏野地すべり地ですべり面の不攪乱試料を採取する機会を得た。温度環境を変化させながら繰返し一面せん断試験を実施した結果、すべり面のせん断強度が温度低下に伴い低下し、せん断抵抗角の減少に影響を及ぼすことを実証した（図 1）。また、温度低下によるクリープ変位の開始・進行を検証する実験を行ったところ、停止状態から変位が開始し、冷却中緩慢に変位が継続する挙動を確認した（図 2）。

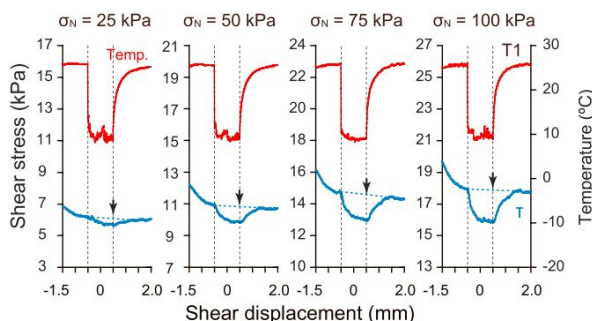


図 1 冷却に伴うすべり面強度の低下現象 (Shibasaki et al., 2016)

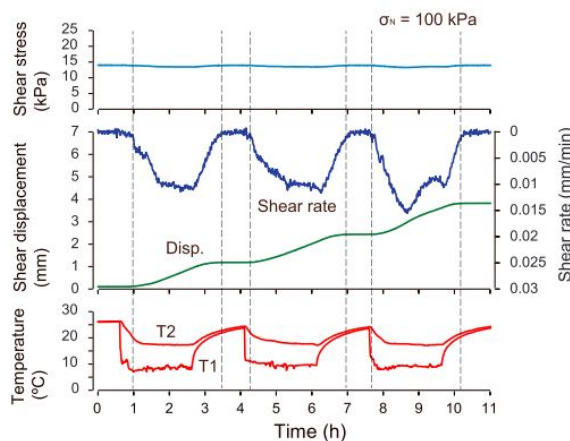


図 2 冷却に伴うクリープ変位の再現実験 (Shibasaki et al., 2016)

リングせん断試験機を用いた長期の実験からも、せん断強度が温度変動に追従し緩やかに変化することも明らかにした。行った一連の実験データを整理すると、スメクタイトを多く含む粘土ほど、せん断強度の温度依存性が顕著なことが明らかとなった(図3)。

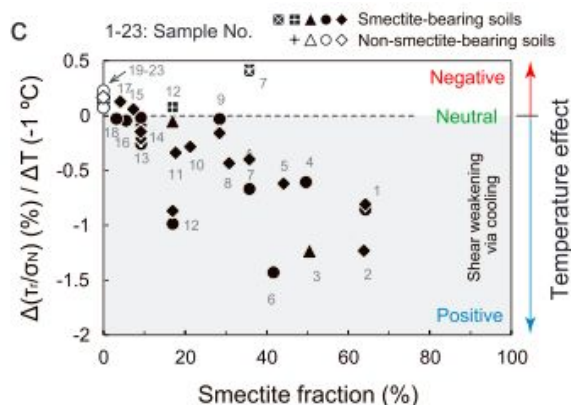


図3 スメクタイト含有量と温度低下による残留強度の変化率との関係 (Shibasaki et al., 2017)

低温環境で強度低下する挙動は、せん断速度が低速条件でのみ認められることが判明した。残留状態にある試料のせん断面や、実際の地すべり面の表面を観察すると、低速条件ほどせん断面が滑らかであり、粘土粒子が強く配向していることが確認された。原子間力顕微鏡を用いた Hisatsune et al.(2009)の先行研究によると、配向したスメクタイト粒子表面の微視領域に発揮される摩擦力は、低温環境ほど低下することが報告されている。粒子配向の進んだ残留状態にあるせん断面では、粒子の結晶構造のシートに沿う摩擦現象が卓越し、せん断面全体として低温環境ほど強度低下する特性が発現すると推察される。一方で、せん断速度が速まると、せん断面では粒子の配向が乱され、低温時に強度低下する特性が失われると考察した(図4)。3年間の研究を通して、上記の温度低下による強度低下メカニズムの一旦が明らかとなり、その成果をまとめた論文を国際雑誌に投稿した (Shibasaki et al., 2017)。

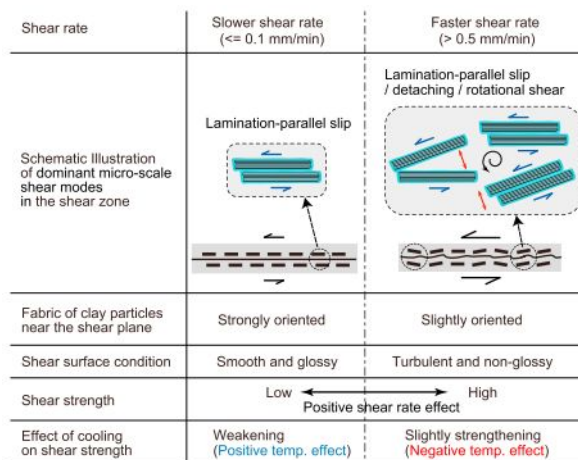


図4 スメクタイトを含む粘土の残留強度の温度依存特性とせん断速度との関係 (Shibasaki et al., 2017)

加えて、残留強度状態での詳細なせん断挙動に着目すると、スメクタイトの種類によっては、特異なせん断挙動が発現することも明らかになってきた。スメクタイトの交換性陽イオンの種類によっては、残留せん断状態においてスティック・スリップ(固着すべり)と呼ばれる小刻みなせん断応力の微変動を起こすものが確認された(柴崎ほか、2016)。特に Ca 型や Mg 型スメクタイトを主体とする粘土は、室温でスティック・スリップ現象が起きやすく、低温になるほどスティック・スリップ現象が喪失する。その発現機構の解明は今後の研究課題となる。

(2) 野外観測の成果

野外観測では、1m 深地温探査や温度検層を3年間実施し、地温の季節変動が起きやすい場所や深度、深度別の水温の季節変動の状況を把握した(図5、図6)。地温の季節変動は、深度10mよりも浅い部分で確認され、表層に近いほど変動幅が大きい。そして、表層から離れるにつれてタイムラグを生じながら変動することが明らかとなった(図7)。将来的には、地温の深度方向の変動特性とすべり面の空間的な形状を加味して地すべりの安定度を評価していくことで、地すべりの動態に地温変動が制約を与える

場合の条件などが検討できる可能性がある。

また、当地すべりでは、積雪深が増大する厳冬期に移動が鎮静化する。その要因として、地すべり移動体を覆う積雪層の影響が指摘される。積雪荷重が地盤表層に作用すると、地盤の横断方向に作用する水平土圧が増大し、地すべりの安定化に寄与する可能性が考えられる。その検証も今後の課題として挙げられる。

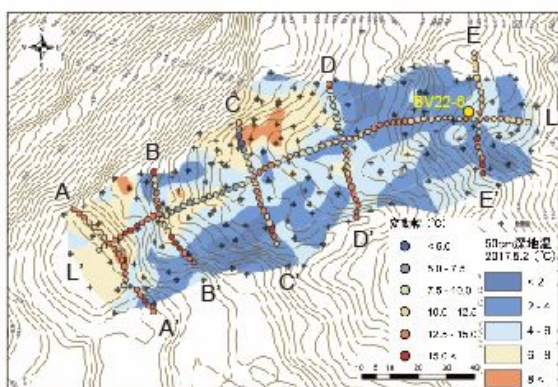


図5 伏野地すべり地における融雪期の 0.5m 深地温分布および各探査測線における 1m 深地温の季節変動幅

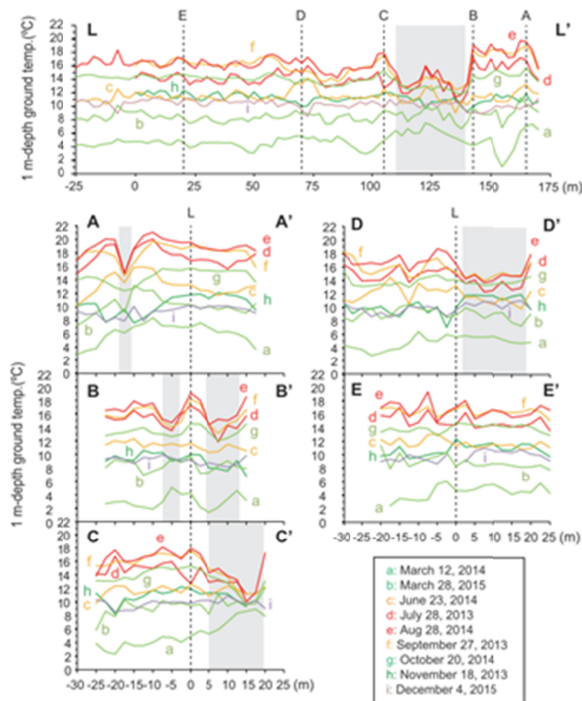


図6 無積雪期における 1m 深地温の季節変動

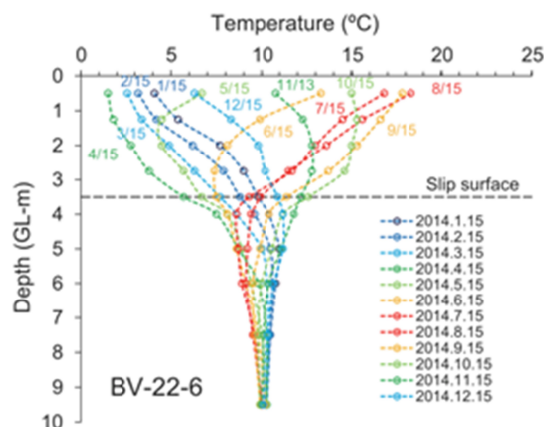


図7 代表的な調査孔の水温の季節変動特性

(3) まとめ

スメクタイトは他の粘土鉱物に比べて特異に小さな残留強度特性を示すことが知られているが、本研究でその温度依存特性を詳細に調べた結果、低温ほど強度低下する特性が明確となった。つまり、寒候期に浅い地すべりが不安定化する要因として、すべり面深度における季節的な地温低下が影響する場合もあることが指摘された。以上の成果の一部は、インパクトファクターの高い国際学術雑誌に論文 (Shibasaki et al., 2016) として掲載され、AGU の EOS Research Spotlight にも紹介された。

本研究により得られた知見は、地すべり観測を専門とする研究者のみならず、斜面防災に関わる行政担当者・技術者にも、地すべりの発生時期の予測や対応を考える上で、問題提起や新たな視点を与えるものである。一般的に、地すべりの不安定化に影響する間隙水圧変動は、降雨や融雪のイベントで急上昇しては消散する。よって、短期的な問題として地すべりの積極的な誘因として作用する的多いと推察される。一方、地温はゆっくりと季節変動を起こすため、寒候期全般長期にわたって地すべり発生のパテンシャルを上昇させる効果となることが予想できる。今後地すべり地での地温観測が積極的に行われるようになれば、多くの現場で本研究仮説の立証が進んでいくものと期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

【雑誌論文】

- (1) Shibasaki, T., Matsuura, S., and Hasegawa, Y. (2017): Temperature-dependent residual shear strength characteristics of smectite-bearing landslide soils, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 122, No. 2, pp.1449-1469. 査読有
- (2) Matsuura, S., Okamoto, T., Asano, S., Osawa, H. and Shibasaki, T. (2017): Influences of the snow cover on landslide displacement in winter period: A case study in a heavy snowfall area of Japan, *Environmental Earth Sciences*, 76:362, pp1-10. 査読有
- (3) Shibasaki, T., Matsuura, S., and Okamoto, T. (2016): Experimental evidence for shallow, slow-moving landslides activated by a decrease in ground temperature, *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, No. 13, pp.6975-6984. 査読有
- (4) Shibasaki, T., Matsuura, S., and Okamoto, T. (2015) A possible mechanism to explain reactivated landslides which begin to move in the early cold season, *Proceeding of 10th Asian regional conference of IAEG*, Kyoto. 査読有
- (5) Shibasaki, T., Matsuura, S., and Okamoto, T. (2015): Temperature-dependent residual shear strength characteristics of smectite-rich landslide soils, *European Geoscience Union 2015-8737*.
- (6) 松浦純生, 柴崎達也, 大澤光, 佐藤北斗(2014): 冬期間における海岸地すべりの移動観測, *雪氷研究発表会(2014・八戸)講演要旨集*, p.93.
- (7) 柴崎達也, 松浦純生, 長谷川陽一(2014): スメクタイトに富む粘土の残留強度の温度依存性とせん断速度との関係, *第53回日本地すべり学会研究発表会講演集*, pp.93-94.
- (8) 柴崎達也, 松浦純生, 岡本隆, 長谷川陽一(2016): スメクタイトを含む粘土のリングせん断挙動に及ぼす交換性陽イオンの影響, *第55回日本地すべり学会研究発表会講演集*, pp.188-189.
- (9) 松浦純生, 柴崎達也, 大澤光, 佐藤北斗(2015): 土壌凍結地帯における地すべりの移動特性, *雪氷研究大会(2015・松本)*, p.107.

【学会発表】

- (1) 柴崎達也, 松浦純生, 岡本隆, 大澤光(2017): 地すべり地における浅層地盤の地温の季節変動特性と積雪深分布, *第56回日本地すべり学会研究発表会講演集*, (投稿中)
- (2) 研究代表者
松浦純生 (MATSUURA, Sumio)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 10353856
- (3) 研究分担者
岡本隆 (OKAMOTO, Takashi)
森林総合研究所・森林防災研究領域・リスク評価担当チーム長
研究者番号: 30353626

6. 研究組織