

北海道知床半島羅臼町における海岸斜面の変動について

山田 真澄*・松四 雄騎*

* 京都大学防災研究所

要 旨

2016年8月17日～23日の1週間に7号、11号、9号の3個の台風が続々と北海道に上陸し、大雨による斜面崩壊が多数発生した。我々は、10月25～27日に知床半島の羅臼町において斜面崩壊の被害調査を行った。斜面崩壊は沿岸の急傾斜部に集中しており、海食崖近隣の斜面に崩壊の発生場が規定されていた。崩壊の堆積物は主にテフラや段丘堆積物であった。また、2015年4月に融雪によって発生した幌萌町地すべりの追加調査も実施した。この地すべりでは崩壊の地震記録が得られており、地震記録から地すべりの崩壊メカニズムを推定できる可能性があることを示した。

1. はじめに

一般に、ある規模の降水による単位面積あたりの斜面変動の発生数は、地形や地質の条件のほか、その地域の気候特性にも依存する。例えば、同じ300 mm/5 hの雨であっても、その再現期間が10年の地域と100年の地域とでは、地形に与えるインパクトが全く異なる。すなわち、より発生確率の低い降水イベントがより大規模・高密度な斜面変動を引き起こす。人為的な気候変化に伴い極端な大気現象の発生頻度が増大している今日、寡雨地域において、従来発生してこなかったような強度と量の降水イベントが、甚大な斜面災害を引き起こすことが懸念される。

近年、本来既往斜面災害の少ない北日本地域において、豪雨や融雪による斜面災害が相次いでいる。特に北海道東部沿岸域では、海食崖近隣斜面の変動がしばしば発生しており、知床半島では、東部沿岸一帯で2016年の8月及び9月に豪雨による斜面崩壊が発生し、また、これに遡る2015年の融雪期には幌萌地区で地すべり性的変動が生じた。これらは、それぞれタイプは異なるものの、海食によって形成された不安定な地形および地質条件を素因とするものであった。こうした斜面変動の形態を類型化し、発生要因や発生過程を特定しておくことは、今後警戒すべき斜面の形状や集落の立地条件を絞り込むうえで有用であろう。本発表では、2016年10月25～27日に行った2016年知床半島東沿岸の被害調査、および2015年幌萌町地すべりの追加調査について報告する。

2. 2016年地すべりの調査報告

2016年8月および9月のイベントでは、台風および前線活動に伴う降雨が、知床半島東部沿岸において多数の斜面変動を引き起こした。崩壊の発生分布と調査地および気象観測点（AMeDAS羅臼）の位置図を図1に示す。

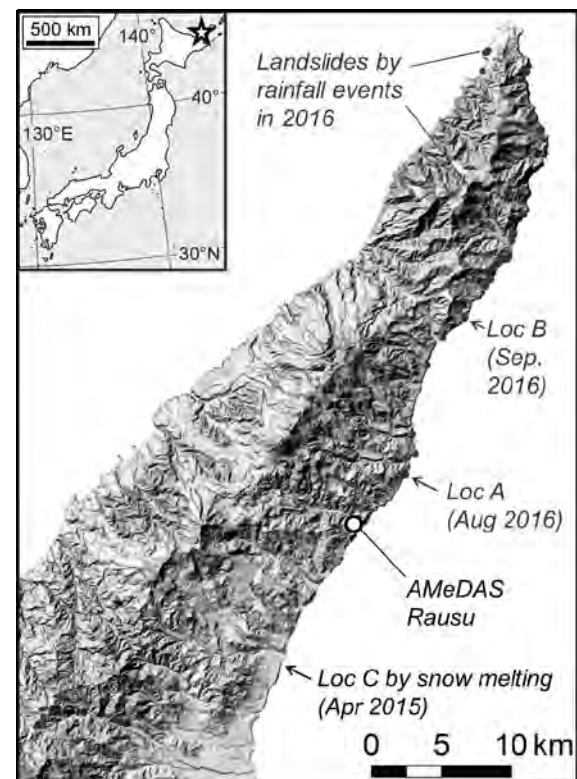


図-1 調査地域位置図

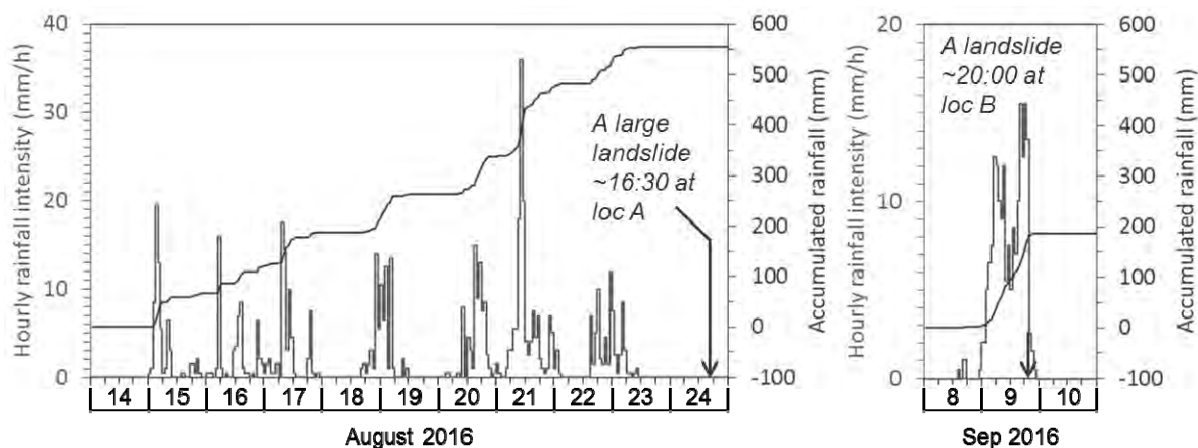


図-2 2016年の8月および9月の発災時降雨状況

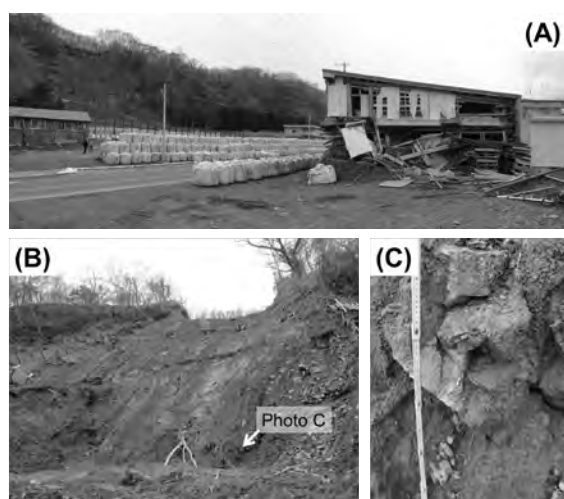


図-3 2016年8月24日に発生した斜面崩壊の状況

降雨の状況と発災のタイミングを図2に示した。2016年8月の降雨では発災の10日ほど前から断続的に雨が降り続き、8月21日の時間雨量30 mm/hを超える大強度イベントをピークにして、合計550 mm以上の雨がもたらされ、降雨終了の翌日8月24日の16:30頃、図1に示したLoc. A地点において大規模な斜面崩壊が発生した。また、9月の降雨では、9月9日の24時間で約180 mmの降雨がもたらされ、降雨最後半の20:00頃、図1に示したLoc. B地点で、大規模な崩落が発生した。

2016年の夏季は概しては梅雨前線活動と台風に伴う降水供給が活発で、発災前の2.5か月で600 mm、発災イベント間の2週間でも約150 mmの雨が、先行降雨としてもたらされている。観測期間の長い中標津観測点のデータでは、夏季から秋季にかけての降雨期(7-10月)の平年値が120-180 mm/月であるから、これらの降雨量が地域的に極めて特異な値であることがわかる。

図1をみると、斜面崩壊は沿岸の急傾斜部に集中していることがわかる。これは、海食によって形成された急崖に崩壊の発生場が規定されているためであると考えられる。図3に2016年8月に発災したLoc. A地点の地形と地質の状況を示す。低位段丘面の山地側に急崖をなす旧海食崖の上部が崩落し、低位段丘面上に建設された道路を横切って周辺の家屋に被害をもたらした(図3A)。崩壊源に近づくと、上部のすべり面は比較的緩勾配であるために見通せなくなり(図3B)、その下位の急傾斜部は溶岩層等の硬岩で構成されている(図3C)。崩壊源頭部ですべり面を形成した比較的緩勾配な斜面の内部にはテフラの成層構造が確認され(図4A)、崩壊物が段丘縁辺部に上載するテフラや段丘堆積物を主とするルーズな堆積物であったことがわかる。この状況は、9月に発災したLoc. B地点でも同様であった(図4B)。

こうした類似性は、他の地点でも広く認められる。また、そのようなタイプのマスマーブメントによって形成されたと考えられる崩壊痕跡や海食崖に懸垂する谷頭凹地も多数認められる。よって、この地域では、図4Cに模式的に示したような、硬岩層に上載する堆積物が低位段丘面上へと崩落するパターンでの斜面災害が典型的に起こるものと考えられる。低位段丘面上には、各種のインフラや、集落が立地していることが多く、地形や地質的な条件が類似する場所では、今後も同様の斜面災害に対する警戒が必要であるといえる。

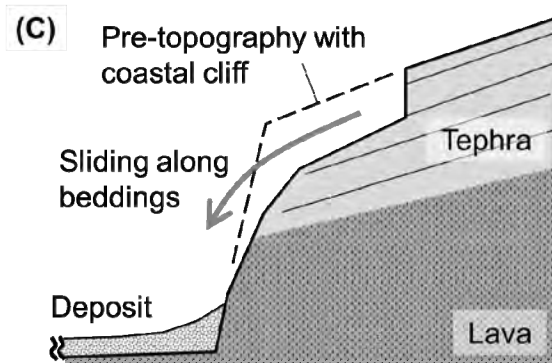


図-4 典型的な斜面崩壊のタイプと地質構造

3. 2015年幌萌町の地すべりについて

2015年幌萌町の地すべりは、北海道目梨郡羅臼町幌萌町の海岸段丘沿いに発生した。地すべりのサイズは幅380 m×長さ260 m程度であり、厚みは15-30 m、体積は $6.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ である（アジア航測株式会社，2015）。この地すべりの先端が座屈することにより、海底が隆起して海面上に現れ話題となった（図5）。地すべりの発生時刻に関しては、4月24日6時30分以前に小規模なすべりが発生し、11時30分から16時30

分間に大規模なすべりが発生したことが目撃証言より分かっている。本章では、現地調査による地すべりの地質・地形学的特徴と地震波形解析による地すべり運動のメカニズム解明について述べる。



図-5 地すべり発生前(2015年2月11日)および地すべり発生後の海岸の状況(2015年4月25日)

3.1 現地調査からみた地質と地形

幌萌町の地すべりが発生した場所は、知床半島の南東部にあたる。この海岸には段丘が形成され、高さ30m程度の崖となっている。元々の地形には地すべり履歴は確認できない。

この地域の地質は主に凝灰岩を層間に含んだ新第三紀の泥岩であり、段丘面は更新世の砂礫とテフラで覆われている。(図-6)。地層は海岸に向かって10度から20度ほどの角度で傾斜している。地すべりの場所では、すべった土塊の上部は凝灰岩層を含み、風化により破碎の進んだ泥岩であり、下部は固い泥岩と厚い軽石質の凝灰岩である。この上部地質におけるいずれかの層境界が地すべりのすべり面を形成したと考えられる。

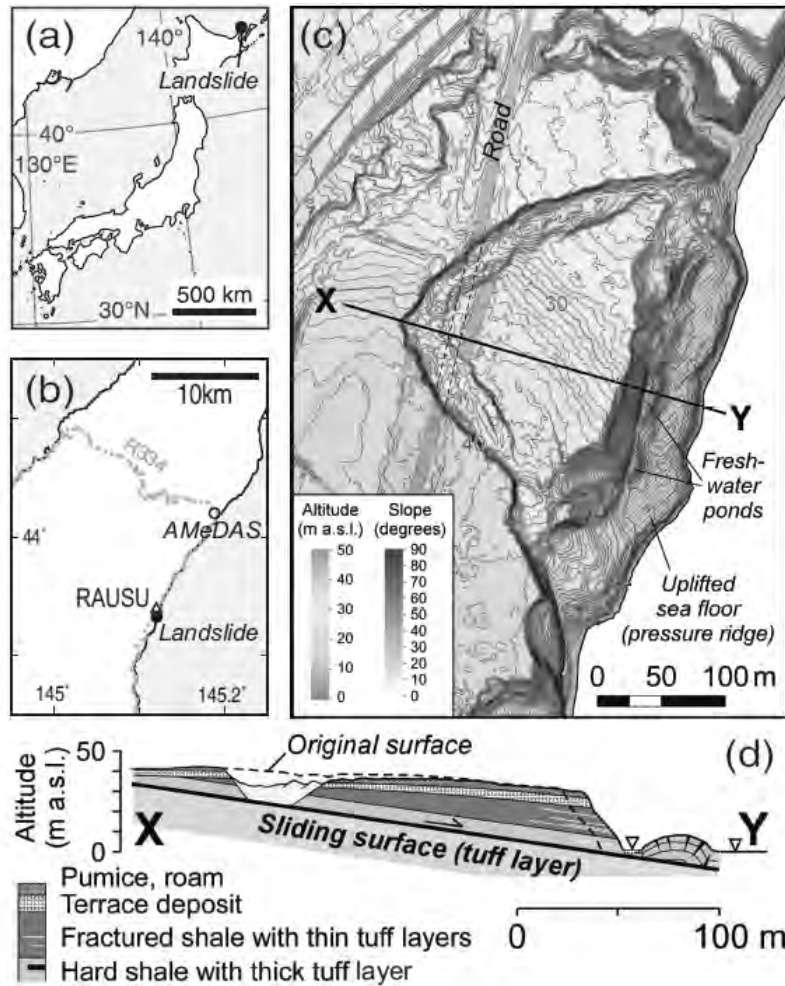


図-6 (a)日本全図(b)知床半島の拡大図。三角のRAUSUが地震観測点、丸印はアメダス観測点(c)地すべり周辺の数値標高モデル(d)図cのX-Yに沿った地質断面図

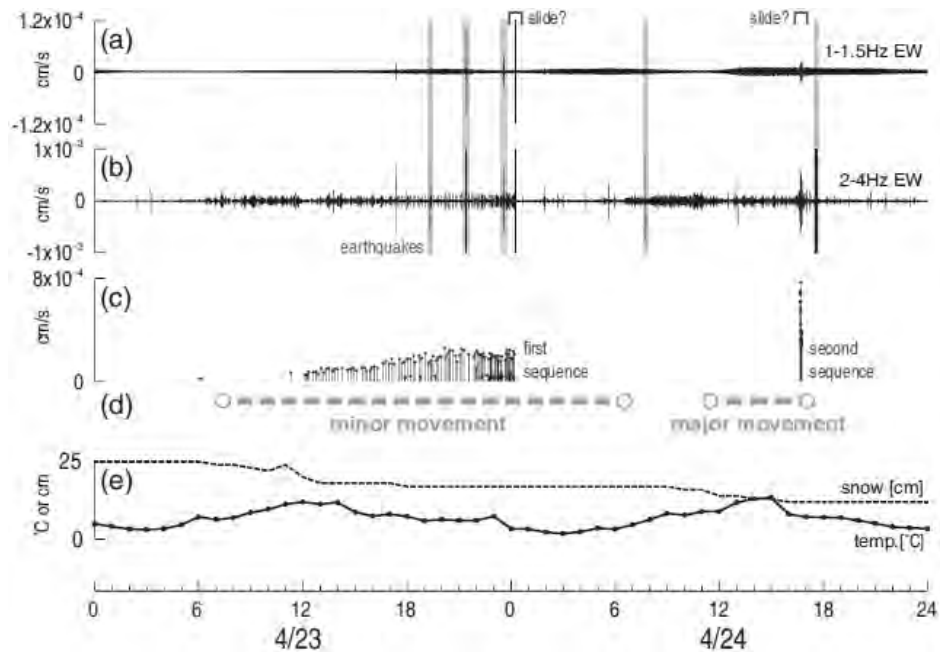


図-7 4月23日、24日の連続波形 (a-b)RAUSU観測点のEW成分(1-1.5Hzと2-4Hz)。鉛直の灰色線は無関係の微小地震を表している。(c) イベントの3成分合成振幅(d) 地すべりの発生時刻を拘束する目撃証言(e)アメダス観測点の積雪量と気温

3.2 地すべり発生前後の地震波形

地すべりに伴う地震活動が羅臼観測点の短周期地震計に記録されている (Yamada et al., 2016)。この地震観測点は地すべりから北へ0.85kmと非常に近距離にあり(図6b参照), 地震と比べて非常に小さい地すべりの信号を捉えることができる幸運な条件にあった。地震計は固有周期1Hzの3成分速度計で, サンプルリングは100Hzである。

図7aと図7bは4月23日と24日の2日間のEW成分の連続波形を示している。図7aは1-1.5Hz, 図7bは2-4Hzのバンドパスフィルタをかけたものである。図7bには23日12時から24日0時にかけて, ほぼ同じ振幅の小さなイベントが多数発生していることが分かる。同様のイベントは, 24日の16時40分から数分間にも発生している。

我々は, 明確に識別できるイベントを手動で切り出し, 波形の形がそれぞれの一連のイベント群でほぼ同一であることを確認した。そこで, マッチドフィルター法を利用して識別の困難なイベントの抽出を試みた (Gibbons and Ringdal, 2006; Peng and Zhao, 2009; Kato et al., 2012)。検出に使った波形の周波数帯は2-7Hzである。1つ目のイベント群からは, 23日6時から翌日0時12分の間に106個のイベントを検出し, 2つ目のイベント群からは, 24日16時40分から16時47分の間に23個のイベントを検出した。図8に検出したイベントをスタッキングして求めた波形を示す。どちらの波形もはっきりとしたP相とS相があり, P-S時間は0.5秒程度である。これは, P波速度を1.2 km/s, S波速度を0.7 km/sと仮定すると地すべり—観測点距離と整合的である。

図9と図10に1つ目と2つ目のイベント群の詳細な発生時刻と振幅を示す。1つ目のイベント群は, 23日6時に始まり, 12時頃から頻度が増えていく。発生間隔は12時以降はほぼ一定だが, 個々のイベントの振幅は時間の関数で線形に大きくなっている。この発生間隔は23日21時頃突然変化する。振幅は頭打ちし, 発生間隔が半分程度に短くなっている。この一連のイベントは24日0時12分に突然止まり, 地すべりの小規模な運動がおこったと考えられる。

2つ目の継続時間の短いイベント群は24日16時40分から16時47分までの間に発生している。このエピソードは発生間隔が数十秒と短く, 振幅が時間の経過と共に短くなり, 発生間隔も短くなっていく(図9)。これらの一連のイベントは, 地すべり運動に直接繋がる前駆的活動を反映していると考えられる。

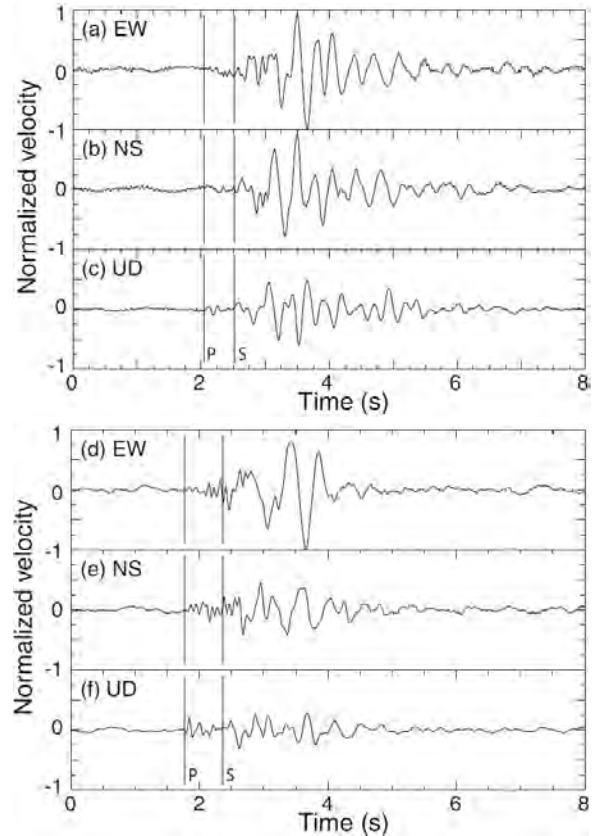


図-8 1つ目(a-c)と2つ目(d-f)のイベント群をスタックした地震波形。P波・S波到着時刻は目視で決定した。

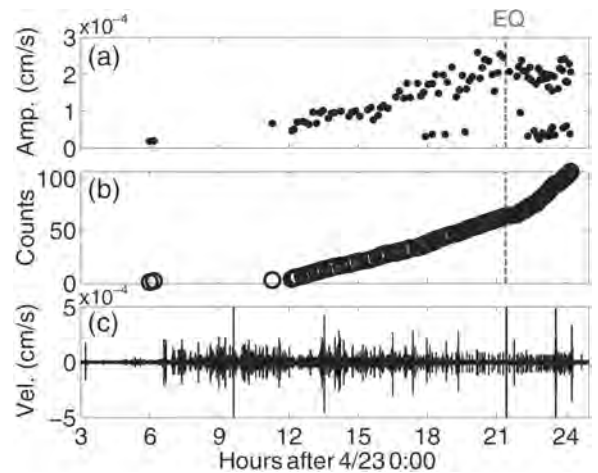


図-9 1つ目のイベント群の(a)3成分ベクトル和振幅, (b)累積個数, (c)2-7HzのEW成分速度波形

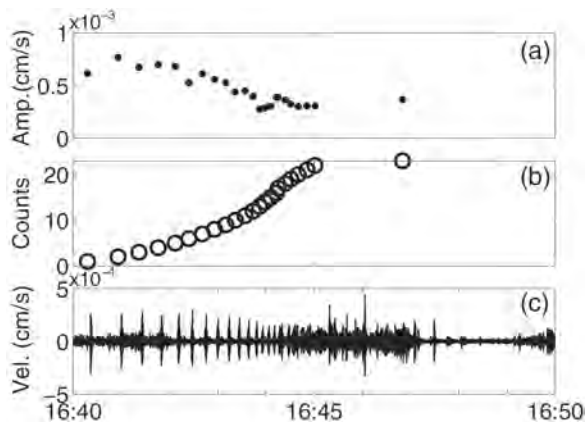


図-10 2つ目のイベント群の(a)3成分ベクトル和振幅, (b)累積個数, (c)2-7HzのEW成分速度波形

3.3 繰り返しイベントの解釈

羅臼観測点の地震波形解析により、2つの地すべり運動の直前に、連続した繰り返しイベントが発生していたことが分かった。それぞれのイベント群の中でほぼ同一な波形となっていることは、連続するイベントがほぼ同じ場所で、非常に狭い領域で発生していることを示している。また、1つ目のイベント群と2つ目のイベント群は波形が全く異なるため、違う場所で発生していると考えられる。

繰り返しイベントの発生は、岩石実験において観測されるスティックスリップ現象 (Brace and Byerlee, 1966) と類似している。同様のスティックスリップ現象は氷河や氷床の運動時にも観測されている (例えば, Caplan-Auerbach and Huggel, 2007; Thelen et al., 2013; Allstadt and Malone, 2014; Helmstetter et al., 2015; Lipovsky and Dunham, 2015)。

スティックスリップ現象は安定したせん断応力の蓄積と、応力を蓄積する固着域の存在を示唆している。この地すべりの場合は、雪解け水による間隙水圧上昇が駆動源となり、すべり面の凹凸によって生成される固着域が脆性的な不安定すべり、つまりスティックスリップを発生させたと考えられる。

イベントの振幅変化や発生間隔は、すべり面の物理的な特性を反映していると考えられる。イベントの発生がほぼ等間隔であることは、地すべりの前駆的運動においてせん断応力の蓄積が非常に安定していることを示唆する。この地すべりは、すべり面の固着域と安定すべり域という不均質構造が地すべり運動に重要な影響を及ぼすということを示した初めての例であり、マスマーブメントの発生メカニズムの理解に新たな解釈をもたらすと考えられる。

4. まとめ

我々は、2016年8月15日～23日及び9月9日に発生し

た大雨による斜面崩壊を調べるため、10月25～27日に知床半島の羅臼町において被害調査を行った。斜面崩壊は沿岸の急傾斜部に集中しており、海食崖近隣の斜面に崩壊の発生場が規定されていた。崩壊の堆積物は主にテフラや段丘堆積物であった。また、2015年4月に融雪によって発生した幌萌町地すべりの追加調査も実施した。この地すべりでは崩壊の地震記録が得られており、地すべり運動の前駆的運動と考えられるスティックスリップ現象が記録されていた。地震記録からマスマーブメントの発生メカニズムを推定できる可能性があることを示した。

謝辞

地震波形は防災科学技術研究所と気象庁によって観測されたデータを使用しました。高解像度の数値標高モデルはアジア航測株式会社より提供していただきました。本研究は自然災害研究協議会の支援を受けています。

参考文献

- アジア航測株式会社 (2015) : 災害関連情報一覧 平成27年4月 北海道羅臼町幌萌町の地すべり, <http://www.ajiko.co.jp/article/detail/ID52LX8TT3L/>
- Allstadt, K. and Malone, S. D. (2014): Swarms of repeating stick-slip icequakes triggered by snow loading at Mount Rainier volcano. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119(5):1180-1203.
- Brace, W. and Byerlee, J. (1966): Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, 153(3739): 990-992.
- Caplan-Auerbach, J. and Huggel, C. (2007): Precursory seismicity associated with frequent, large ice avalanches on Iliamna volcano, Alaska, USA. *J. Glaciol.*, 53(180):128-140.
- Gibbons, S. J. and Ringdal, F. (2006): The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophys. J. Int.*, 165(1):149-166.
- Helmstetter, A., Nicolas, B., Comon, P., and Gay, M. (2015): Basal icequakes recorded beneath an alpine glacier (glacier d'argentire, mont blanc, france): Evidence for stick-slip motion? *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 120(3):379-401.
- Kato, A., Obara, K., Igarashi, T., Tsuruoka, H., Nakagawa, S., and Hirata, N. (2012): Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake. *Science*, 335(6069):705-708.
- Lipovsky, B. P. and Dunham, E. M. (2015): Tremor during ice stream stick-slip. *The Cryosphere*

- Discussions, 9:5253-5289.
- Peng, Z. and Zhao, P. (2009): Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. *Nat. Geosci.*, 2(12):877-881
- Thelen, W. A., Allstadt, K., De Angelis, S., Malone, S. D., Moran, S. C., and Vidale, J. (2013): Shallow repeating seismic events under an alpine glacier at Mount Rainier, Washington, USA. *J. Glaciol.*, 59(214):345-356.
- Yamada, M., J. Mori and Y. Matsushi (2016): Possible stick-slip behavior before the Rausu landslide inferred from repeating seismic events. *Geophysical Research Letters*, 43, doi:10.1002/2016GL069288.