

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属		役職
	かさい みお 笠井 美青		北海道大学大学院 農学研究院		准教授
②研究テーマ	名称	火山と地すべり地におけるUAV搭載型LP計測による地表変動評価手法の開発			
	政策領域	[分野] 地域課題分野 (砂防) [公募課題] 砂防	融合技術	リモートセンシング、地形解析	
③研究経費 (単位: 万円)	平成26年度	平成27年度	平成28年度	総合計	
	※端数切り捨て。 1,485	1,499	1,925	4,909	
④研究者氏名					
氏名		所属・役職 (※平成29年3月31日現在)			
丸谷 知己		北海道大学大学院農学研究院・特任教授			
桂 真也		北海道大学大学院農学研究院・助教			
⑤研究の目的・目標					
<p>【目的】火山山麓と地すべり地を対象に、UAV 搭載型の LP 計測に関するノウハウを蓄積・整理し、起こり得る各状況に対応した UAV 調査計画を作成する。</p> <p>【調査・研究内容及び成果】 火山山麓では、降灰やガリーの発達による地形変化を的確に把握する為の UAV 搭載型の LP 計測法を調べる。地すべり地については、平成 23 年度から実施した地域課題にて、UAV 搭載型の LP による定期観測が地すべりブロックの活動の把握に有効であることが明らかになったので、本研究でも引き続き定期観測を進める。そしてブロックの活動を示す微地形の特徴を明らかにすることで、定期観測の対象としたり、対策を施したりすべき地すべり箇所を抽出する手法を示す。</p>					

⑥研究成果

平成26年から28年の各年度において、計測は10月下旬の1週間で実施された。各計測地の概要を以下に示す。

	計測地	計測年 (10月計測)			特徴	目的
		H26	H27	H28		
地すべり	薄別川沿い	○	○		多数の地すべり地形	地形解析による緩慢に移動している斜面の抽出
	岩知志地区		○	○	活動的な地すべり	地形解析による活発に移動している斜面の抽出
	手稲山麓	○	○	○	山麓直下が都市部	LPデータと地上計測データとの比較
火山	支笏湖温泉	○			樽前山噴火時に降灰の予想	現時点での地形データを蓄積
	覚生川扇状地		○		樽前山噴火時に泥流の予想	現時点での地形データを蓄積
	ポロピナイ川	○			恵庭岳山麓で平成26年9月土石流発生	有事の際のUAVの利用の仕方について検討
	ペケレベツ川	○		○	平成28年8月源頭部で発生した土石流によって引き起こされた、水系を通じた河床変動	有事の際のUAVの利用の仕方について検討

成果1 LP機器の違いによる計測値および解析値の比較

平成27年度は、各計測地でSkEyes社の新旧タイプのLP (SkEyes Box) を用いて2度ずつ計測を行った。計測器のスペックを表1に示す。

表1 新旧LP (SkEyes Box) のスペックの比較

	重量	スキャンアングル	レーザー到達距離	レーザー光径	レーザー発射回数	レーザー強度
新	11 kg	250度	250 m	2 mm x 0.25 mrad	50 - 100 Khz	Class 1 4 th パルス
旧	11.8 kg	250度	200 m	3 mm x 0.5 mrad	12 Khz	Class 1M ファースト・ラストパルス

各計測については、1, 2, 5, 10 mのセルサイズのDEMを作成し、同箇所における計測値の違い、および解析値の代表として斜面勾配の違いを調べた(表2, 3)。その結果、以下の事が分かった。

- (1) 斜面については、差分は1-2 m DEM、解析は2-5 m DEMの使用が望ましい
- (2) 斜面については、標高値±0.7 m、勾配 ±5° までは、実用の上で誤差の範囲とみなせる。すなわち、他時期のLP計測から得られた標高の差分「値」の信頼性は低い。ただし現地調査より、値の分布は顕著に変動する箇所を見出す際に有用であることが示されている。
- (3) 計測誤差が出やすい箇所は、谷間・遷急/遷緩線付近・計測範囲境界である。

表2 計測範囲にて標高差が絶対値 0.7m以下のセルの割合 (%)

	DEM	1 m	2 m	5 m	10 m
地区名	薄別	89	86	56	34
	手稲	78	80	52	43
	岩知志	79	69	56	57
	覚生	93	93	82	82

表3 計測範囲にて斜面勾配が絶対値 5度以下のセルの割合 (%)

	DEM	1 m	2 m	5 m	10 m
地区名	薄別	64	84	87	78
	手稲	53	72	78	81
	岩知志	59	75	91	96
	覚生	76	91	91	94

成果2 地すべり地における計測および解析結果

(1) 崩積土斜面の判別

定山溪地区薄別川沿いの計測地付近では、地すべり地形は多数見られるものの、現在では地すべりの活動は顕著ではない。過去の現地調査からは、近年は地すべり土塊が移動するよりも、崖錐斜面上を砂礫が移動しているケースの方が多く見られることも分かってきた。そのような斜面の末端を切ることがあれば、その上部の斜面が一気に崩れる可能性が大きい。そこで本研究では、崖錐斜面を抽出するための航空測量データの解析方法を、地形解析と現地調査を行うことにより求めた。地形解析により崖錐の存在が示唆された範囲は、現地調査でも崩積土の存在、または崩積土の崩れをほぼ確認できたが、差分値との関係は不明瞭であった(図1)。



図1 薄別地区における、崩積土の分布状況と地形要素との関係。現地調査で厚い崩積土の存在、または崩積土の崩れを確認できた箇所や、その上部には、固有値比が5.0から5.3、斜面勾配が38から40度(以上、セルサイズ:2m)、かつ平面曲率が-1.472以下(セルサイズ10m)のラスター(緑)が分布している場合が多い。ピンクは2010から2014年のLP計測の差分が-0.2から-0.5mあった箇所。

(2) 地すべり活動度指標とその応用

岩知志地区では、沙流川沿いに複数の活動的な地すべりブロックが存在する(図2)。本研究では、平成22年および27年に取得したLPデータより作成した1mのDEMを用い、各地すべりブロックにて±1m以上の変動が見られたセル(図2)が占める割合を地すべり活動度とした。また、この指標と河川の斜面への入射角 θ の関係を調べ、流水による脚部の浸食が激しい斜面では地すべりの動きが活発であることを示した(図3)。

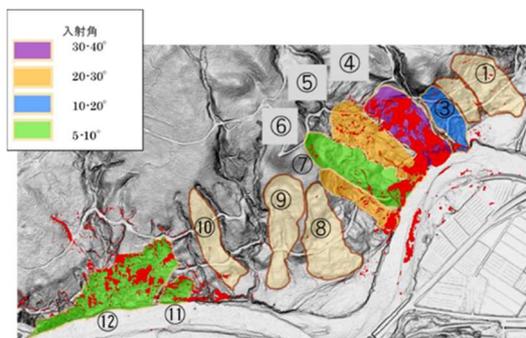


図2 各地すべりブロックに対する流水の入射角と、平成22年から27年にかけて1m以上の差分値が1mサイズのセルで示された箇所(赤)。

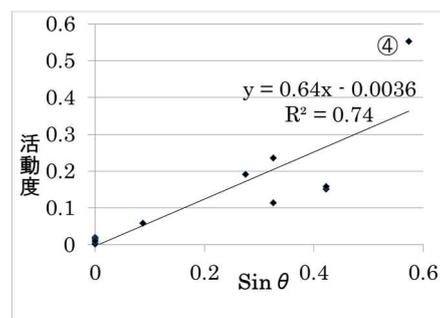


図3 入射角と地すべり活動度の関係

(3) LP定期計測を活用した地すべり活動の把握

斜面のLP計測データは、地表を被覆する植生の影響をうけて誤差が大きくなりがちである。地形の変化を捉えるために、LPデータの標高差分解析が一般的にはなってきたものの、斜面変動を量として表すときには注意が必要である。そこで、「地表変動があった場所は、その場所の凹凸が変化するはずである」との考えに基づき、変動箇所の抽出の為に、2 m DEMから求めた「曲率」の差分を用いて、岩知志地区および手稲地区の地すべりを対象に検討した。以下に結果をまとめる。

【岩知志地区】(図4左)

- ・ 曲率の差分値が大きかった箇所の分布は、2015年から2016年にかけて、DEMの差分が0.8 m以上あった箇所の分布とほぼ一致
- ・ 赤丸で囲った範囲は、DEMの差分によると地表の変動があったことが示唆されるが、曲率に大きな変化はなかった： 現地でも斜面に変化はない

【手稲地区】(図4右)

- ・ 図中Aに設置された傾斜計計測ではすべり面の位置が明瞭であり、曲率差分が大きい値のセルも近傍にまとまって分布した(青矢印)。
- ・ 図中Bに設置された孔内傾斜計計測ではすべり面の位置が不明瞭であり、曲率差分が大きい値のセルも周囲には疎らにしか存在しない。

以上から、曲率の差分は地すべりブロック内にて変動が発生している箇所の抽出に有効なことを示唆できた。

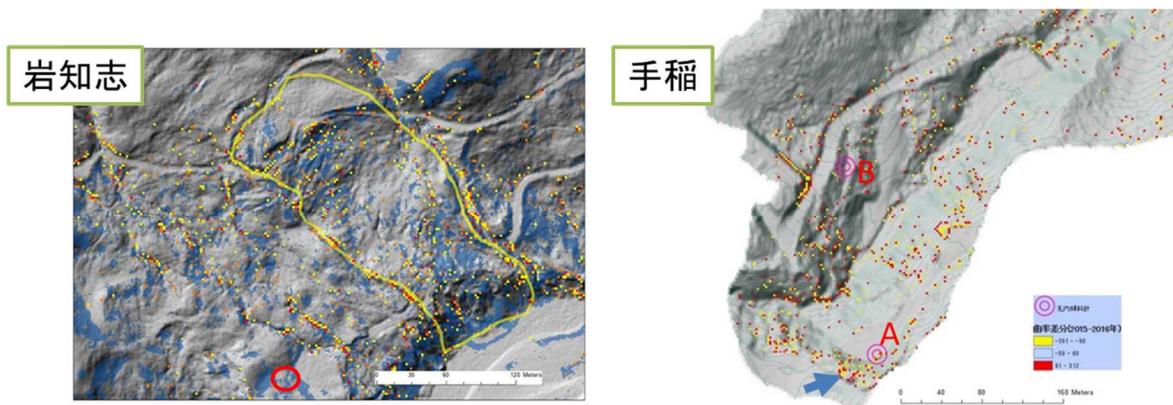


図4 平成27年と28年取得のLPデータから作成された2 m DEMから求めた曲率の差分図。-60から60までの値は変動なしとみなして省く。図左は岩知志地区の活動的な地すべりブロック。平成27年から28年までに標高値に0.8 m以上の変動があったとされる箇所は青色で示す。下図は手稲地区の左下部分を拡大。下図の等高線は2 m間隔。

成果3 火山山麓における計測および解析結果

(1) 平時の計測におけるデータ蓄積の有効性

火山山麓にて噴火後に泥流の氾濫・堆積が予測される扇状地にて、あらかじめ地形を精度よくかつ詳細に計測しておけば、有事の際の堆積土砂量の把握や施設の機能評価に役立てることができる。覚生川セルダム建設地での計測から、植生が繁茂しているものの扇状地での計測誤差は小さく、差分データの値も信頼できることがわかった(図5)。すなわちLPデータが整備されていない火山泥流到達予測地域にて、地形データの蓄積を、UAVを用いて進めることは有効である。

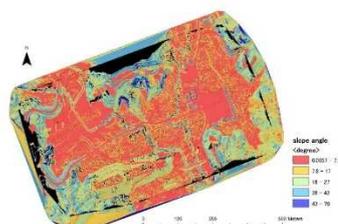


図5 LPデータより作成した斜面勾配図。黒は、新旧のLPの計測値で、絶対値が0.7 m以上の差があった範囲(1 mDEM)。

(2) 有事の際の現象のプロセスの早期解明

1) 恵庭山麓ポロピナイ川

平成26年9月に土石流が発生した恵庭山麓のガリーにて、翌10月にUAV搭載型LP計測を実施した（図6）。この計測では、平成22年の有人ヘリコプターによるLP計測よりもグラウンドデータの点密度が多く、測量データ自体の質は高かった。溪流の地形変化を求める時には、LPデータの単純差分は植生の影響を受けない点で有用であるものの、数キロメートルに及ぶ土石流の流下・堆積を把握する際には、やはり有人飛行による計測が望ましいことがわかった。

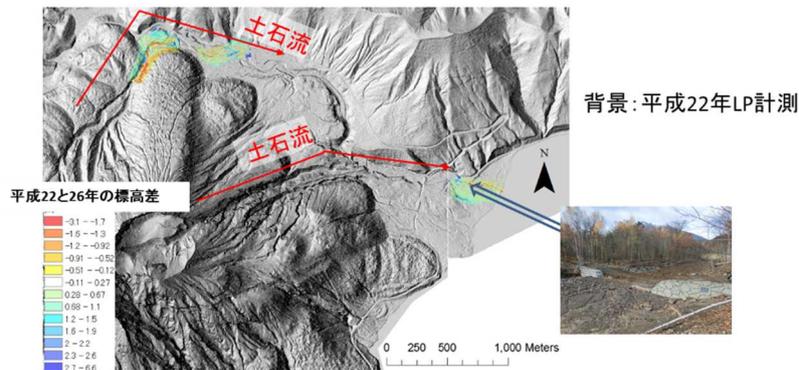


図6 ポロピナイ川における平成22年および26年度のLPデータの差分値

2) 十勝川水系ペケレベツ川上流

ペケレベツ川は、平成28年8月に発生した豪雨により、河床が全区間を通じて拡幅した。河床は一概に上昇したものの、火砕流堆積物の下刻が進んだ箇所もある。豪雨後には不安定土砂が河道内に多量に堆積し、今後も土砂移動および河床の変動が激しくなることが予想される。そこで、この拡幅を引き起こしたプロセスを把握し、その知見を今後の河床変動に対する対策にいかすべく、流路変動の引き金になったと考えられるペケレベツ川上流部3 kmの区間にて、無人ヘリによるLP計測を行った（図7, 8）。その結果、側岸からの土砂の生産と、生産された土砂の堆積が繰り返されることにより、河道が拡幅したことが推定された。



図7 無人ヘリLPとオルソ写真を重ね合わせて作成した3D画像

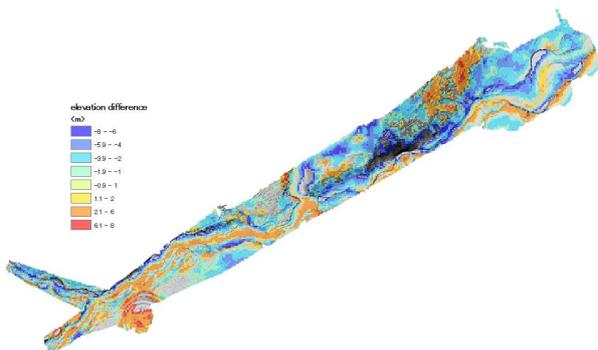


図8 出水前後の標高値の差分（出水前：国土地理院10 mDEM、後：今回の計測、および横断地形の変化）

成果4 火山および地すべり地におけるUAV調査計画

以下に、上記結果を踏まえて作成した計測フローをまとめる。

1. 定期計測

(1) 地すべり地

計測と解析の手順として

① UAV基地設置可能場所を押える。

条件は、(1)見通しがきく、(2)取得対象箇所内に交通量が多い道路がない、(3)ヘリの発着場を確保できる

② 計測不能な天候条件を整理する

③ 現地形、および各箇所の変化の傾向を把握する

1) 現時点の地形については、LP計測を行い、1 mセルサイズのDEMを作成する。このDEMより地形図（等高線図、斜面勾配図、陰影図）を作成し、地すべりブロックや、ブロック内の亀裂や段差の分布を調べる。ただし、地すべり地形には過去長期間の変動が累積して現れていることから、亀裂や段差などの地すべり活動を示す微地形が存在したとしても、現在は年数ミリ程度の緩慢な移動のみしている可能性があることを留意する。

2) 過去のLP計測のデータがあれば、各年代について2 mセルサイズのDEMを作成し、曲率を求め、その差分値を調べる。そして1) で把握した地すべりブロックや微地形の分布と比較し、一致していれば定期計測、および地上での計測対象地とする。ここで地上での計測は、孔内傾斜計の他、伸縮計やGPS定点測量などが考えられる。

動きが年数ミリ程度の緩慢な地すべりでは、LP計測による標高値は、計測誤差の範囲に入る可能性が高くなるため、定期計測には余り適さない。一方、定期計測に適するのは動きが年数メートルになるような活動度の高い地すべり地である。定期計測に関して留意すべきことは、地すべり地に植生が被覆している限りは標高値の計測誤差は無視できない。すなわち差分値を求めるにしても、地表変動箇所の抽出を用いることに留めるべきと考える。地上での計測値は点のデータであり、LP定期計測では、面としてブロックの動きを把握できることから、両者を組み合わせることで、地すべりの動きを3次元でとらえることが出来る。

(2) 火山山麓

計測と解析の手順として

① UAV基地設置可能場所を押える。

② 計測不能な天候条件を整理しておく

③ 現在の地形、および各箇所の変化の傾向を押える。未固結の火砕流堆積物を下刻するガリー地形の変化を把握する場合には、急速な変動が想定されるので、出水があれば、その後のデータの取得などの頻度の高い計測が望ましい。この場合には、1 mセルサイズのDEMを作成し、その差分値を求めることで地形の変化を把握する。

なお噴火が想定される火山でも、LPデータが整備されていない場所もある。そのような箇所では、無人ヘリ搭載型のLP計測を実施することで、有事の際に有用となる地形データの蓄積をはかることが有効であると考えられる。

2 有事の際のデータ取得・解析

(1) 地すべり地

① UAV基地設置可能場所を押える。留意すべき点は本章のはじめに述べた通りである。

② 計測可能な天候条件が合えば、すぐにデータが取得できるよう体制を整えておく。

③ LP計測を行い、1 mセルサイズのDEMを作成する。このDEMより地形図（等高線図、斜面勾配図、陰影図）を作成し、地すべりブロックや、ブロック内の亀裂や段差の分布を調べ、迅速な対策の為の資料とする。

④ 過去のLP計測データがあれば、1 mセルサイズのDEMを作成する。このDEMより地形図（等高線図、斜面勾配図、陰影図）を作成し、③で作成した資料と比較し、地すべりの移動状況を把握する。

⑤ 「有事の場合」の地すべり移動とは、1日あたり数10 m 以上の変動があることも考えられる。すなわち、LP計測の誤差範囲を無視できる場合には、③と④で得たDEMの差分値を求め、変動の激しい箇所を把握し、ブロック全体としての動きを捉えることに役立つ。変動の激しい箇所については、定期計測のセットアップを迅速に行う。そして視覚的に、かつ量的に地形変化を経時的に押えていく

(2) 火山山麓

① UAV基地設置可能場所を押える。留意すべき点は本章のはじめに述べた通りである。場所は、できれば

噴火の前に把握しておくことが望ましい。この際、UAVによる計測範囲は数km²であることに留意すること。

② 計測可能な天候条件が合えば、すぐにデータが取得できるよう体制を整えておく。

③ LP計測を行い、1 mセルサイズのDEMを作成する。このDEMより地形図（等高線図、斜面勾配図、陰影図）を作成し、現地形を迅速に把握できるようにする。

④ 過去のLP計測データがあれば、1 mセルサイズのDEMを作成する。このDEMより地形図（等高線図、斜面勾配図、陰影図）を作成し、③で作成した資料と比較するとともにDEMの差分値を求め、噴火による地形の変化を把握する。

⑤ 定期計測のセッティングを行う。この計測は、地形の変化が落ち着くまで、③と④を繰り返す。

火山では、噴火が起こった後、刻々と地形が変化していくことが予想される。迅速かつ定期的な計測のセッティングが出来れば、有人飛行によるLP計測を実施するよりも安価に且つ短い間隔で、この地形変化を把握していくことが可能である。火山灰の堆積分布については、噴火前後のデータからは、少なくとも分布を大まかに把握すること、また植生が疎になった後には、厚の変化を値として正確に捉えられると考える。ガリーの発達についても、地質図などを参考にしてガリーの発達について予測を行い、計測の頻度を柔軟に変更しつつ、経時的にその変化を把握していく。

⑦研究成果の発表状況

- ・ これまでに発表した代表的な論文
- ・ 著書（教科書、学会妙録、講演要旨は除く）
- ・ 国際会議、学会等における発表状況
- ・ 主要雑誌・新聞等への成果発表
- ・ 学術誌へ投稿中の論文（掲載が決定しているものに限る）
- ・ 究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・ 企業とのタイアップ状況
- ・ 特許など、知的財産権の取得状況
- ・ 技術研究開発成果による受賞、表彰等

国際学会発表

- ・ Asia and Oceania Geosciences Society 2014 （7月、札幌）
- ・ American Geophysical Union Fall meeting, 2014 （12月、サンフランシスコ）
- ・ American Geophysical Union Fall meeting Fall meeting, 2015 （12月、サンフランシスコ）
- ・ JPGU 2016 （5月、千葉）
- ・ Australian and New Zealand Geomorphology Groupd meeting, 2017 （2月、グレイタウン、ニュージーランド）

学会誌への紹介記事

- ・ 観測の現場から（砂防学会誌、Vol 67）

⑧研究成果の社会への情報発信

なし

⑨表彰、受領歴

なし

⑩研究の今後の課題・展望等

- ・ 場所によって、要求されるデータの精度、計測範囲、計測頻度が異なる。各箇所について、何が要求されているのか条件を整理した上で、UAV搭載型LP計測について、適用可能/不可能な条件の絞り込んでいく必要がある。そのためには、計測と現地調査とを平行しておこない、現地の状況を的確に反映するような解析手法や、対象とする地形の変動を的確に捉える為のデータ取得方法や条件の検討する必要がある。
- ・ 汎用性のある手法の提案

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

火山と地すべり地を対象に、本研究で示した調査フローを適用することにより、安価に且つ迅速に地形変化を把握することが出来、将来の施設設計や調査計画作成に役立てることができる。UAV搭載型のLP計測は、計測範囲は限られてはいるものの、何等かの事象が発生した場合には、迅速に現象のプロセスを把握するために活用できる。そのためには、火山については、まだLP計測が整備されておらず、かつ噴火の際に大幅な地形変化が見込まれる場所については事前にデータの蓄積を行う。また、地すべりについては、地形の変動が年間数メートルの単位で起こっている場所については、UAV搭載型のLP計測を定期的実施することにより、地形変化を詳細に経時的に把握していくことができる。地形解析を行えば、緩慢に地形が変化している箇所を抽出することも可能ではある。しかし、この場合には過去に土塊の移動が発生した箇所を示している例もあり、現在もその移動が継続しているかについての判断は現地観測を行い確認する必要がある。