

報告書概要

①技術研究開発テーマ名	異常土砂流出時に立入が困難な区域における迅速な緊急調査・危険度評価に関する調査研究
②研究代表者	
氏名	所属・役職
笠井 美青	北海道大学大学院農学研究院・准教授
③共同研究者	
氏名	所属・役職
丸谷 知己	北海道大学大学院農学研究院・教授
④背景・課題	
<p>豪雨や地震等に伴う斜面崩壊により天然ダムが形成され、決壊した場合は短時間で市街地まで洪水流が到達し、甚大な被害が想定される。現状ではこれら想定現象への初動対応に際して、以下の課題がある。</p> <p>◇土砂移動発生直後の危険な時期や天候不順時、低高度での計測が必要な場合、人や有人航空機が容易に立ち入れず、現状把握や対策判断が遅れる。</p> <p>◇対象エリアが狭く、山深い場所での緊急調査は、コストがかかる。また飛行や現地調査に危険が伴うほか、調査に時間を要する。</p> <p>◇データ取得から解析完了までに時間を要し、情報発信が遅れて避難勧告発令が遅れたり、対策着工判断が遅れて災害が拡大したりする可能性がある。</p>	
⑤技術研究開発の目的	
<p>本研究では UAV (unmanned aerial vehicle: 無人飛行体) に、詳細な測量が可能な LP (レーザープロファイラ) や、悪天候でも画像の取得が可能な SAR (合成開口レーダー) を搭載して計測を行うことで、異常土砂流出時に迅速に現地荒廃状況を把握する為の、緊急時の初動対応ルーチンを提示する。</p>	
⑥技術研究開発の内容・成果	
<p>本研究では以下の項目を実施した。</p> <ol style="list-style-type: none">(1) 無人ヘリコプター搭載型 LP 計測(2) LP データを使用した斜面変動箇所の把握と危険度評価指標の検討(3) 無人ヘリコプター搭載型 SAR 計測(4) 無人ヘリコプター使用による現地状況把握と危険度評価の作業要領案提示	
使用 UAV (無人ヘリ) 概要	
<p>本研究で使用する UAV は、北海道開発局所有の無人ヘリコプター (ヤマハ自律航行型無人ヘリコプター RMAXG1) である (写真 1)。</p>	

仕様

全長：3.63 m

全幅：1.08 m

最大飛行時間：80 分

飛行高度：地上高 150 m 以下

飛行距離：半径 5 km 以内

計測機器積載量：10 kg 以内

飛行できない条件

1. 飛行高度と同距離の半径に人間を確認
2. 航空法で定められる産業用無人ヘリコプターの禁止空域

飛行出来ない可能性のある条件

1. 降雨、降雪等悪天候時
2. 気温が $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ よりも低い時
3. 地上での風速が 10 m/s を超える時
4. 飛行高度が地表、または水面から 150 m を超える時
5. その他、飛行が困難と思われる条件が揃った時

その他、自主基準として

- 離発着場の基地ヤードとして半径 20 m の範囲は確保する
- 目視内飛行



写真1 ヤマハ自律航行型無人ヘリコプター RMAXG1

(1) 無人ヘリコプター搭載型 LP 計測

無人ヘリコプターに搭載する LP は SkEyesBOX MP-1 (SkEyes 社) である。LP の諸元を以下に示す。

- ・レーザー発射周波数： $12,000\text{ Hz}$
- ・スキャン角： 全方位
- ・スキャン周波数： 50 Hz
- ・ビーム広がり角： 3.0 mrd

- ・距離分解能： 4 mm
- ・標高精度： ± 25 mm
- ・対地高度： 30-150 m

本研究では過去3年間を通じて、無人ヘリコプター搭載型LP計測を、石狩川上流域2か所（層雲峡温泉周辺：標高 650 m）と豊平川上流域3か所（白井川沿い：標高 350 m、薄別川沿い：標高 340 m、無意根大橋周辺：標高 560 m）で実施した。LPは11 kmと重い為、標高が高い調査地ではヘリコプターを高く飛ばすことが困難であった。加えて石狩川の調査地では側壁が急な箇所での測定の為、ラジコン操作に必要な見通しが確保できる空間が狭かった。一方で白井川調査地と薄別川調査地では、見通しを確保できたと同時に、ヘリコプターを地上から150 m付近までの高さまで上げることが出来た。

白井川と薄別川調査地では、平成22年に有人セスナによるLP計測がなされている。その概要は以下の通りである。

- ・計測時期： 平成22年8月27日（白井川）、6月8・13日（薄別川）
- ・飛行高度： 1,800 - 2,300 m
- ・対地高度： 679 - 1,929 m
- ・対地飛行速度： 70 m/s
- ・コース間重複： 50 - 75 %
- ・レーザーパルス頻度： 50 khz
- ・スキャン角度： ±20度
- ・ビーム径： 0.2 mrad
- ・計測機材： ALTM3100 (Optech社)、ALS50II、ALS60 (共にLeica社)

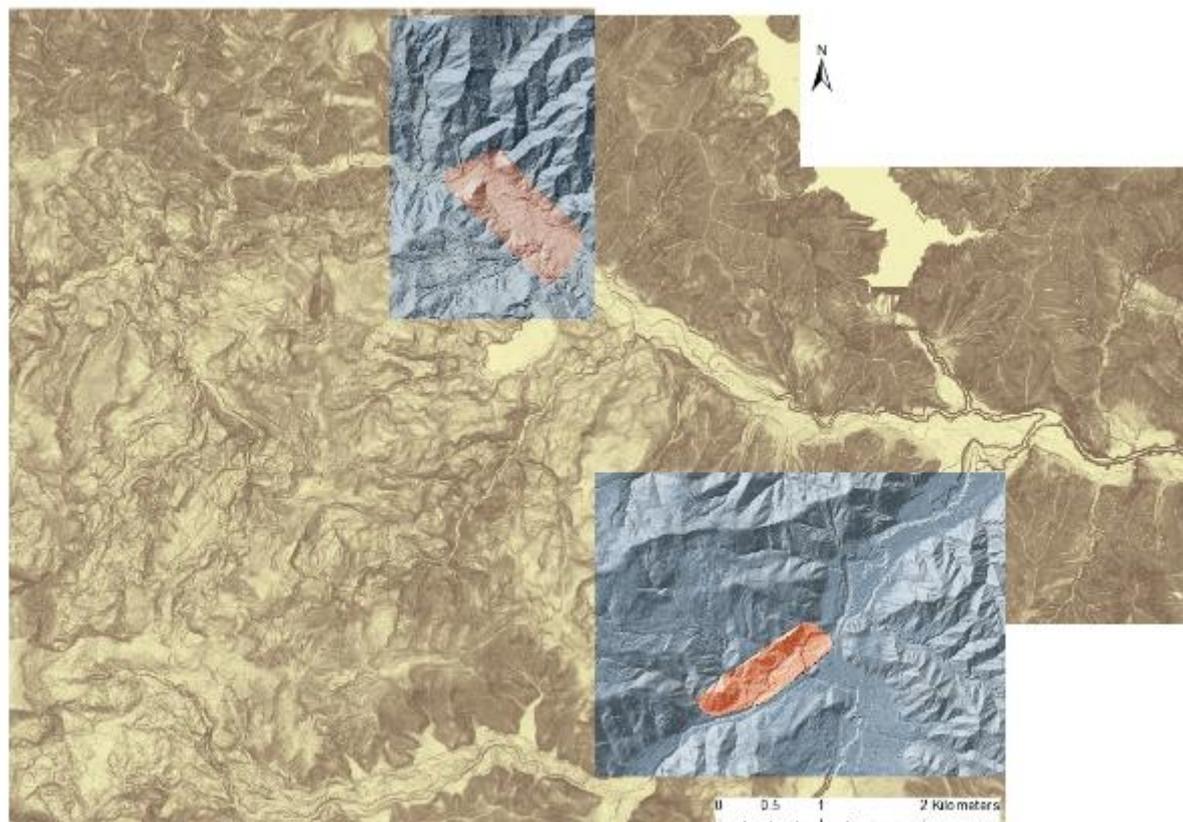


図1 豊平川上流部。北側の陰影図が白井川、南側が薄別川の調査地周辺。赤茶色で示した範囲が、無人ヘリによってLPデータを取得した範囲

両調査地について、道路等の不動点にて平坦面状に設定した半径 1 m 円内の有人セスナによる LP データの平均値と、無人ヘリコプターによる LP データ（白井川調査地：平成 25 年 10 月計測、薄別川調査地：同年 9 月計測）の平均値をそれぞれ求め、比較した結果を表 1 と 2 に示す。斜面の動態を調査するにあたっては、メートルスケールで地形変化を把握できれば十分であると考えられる。表で示した通り、較差は数 10 cm 以下で抑えられているので、無人ヘリコプターによる LP データは、斜面の状態を判断するにあたって有効に活用できると考えられる。

表 1 比較一覧表（白井川調査地）

比較地点	標高(m)		データ数		標準偏差(m)		較差(m)	備考
	小形無人ヘリ	航空レーザ	小形無人ヘリ	航空レーザ	小形無人ヘリ	航空レーザ		
1	371.50	371.48	5	4	0.03	0.02	0.01	舗装道路
2	367.53	367.58	9	3	0.02	0.02	-0.05	"
3	-	365.49	3	3	-	0.02	-	"
4	-	361.56	0	3	-	0.03	-	"
5	359.48	359.34	10	2	0.03	0.01	0.14	"
6	357.17	357.10	3	4	0.01	0.02	0.07	"
7	367.26	367.22	6	3	-	0.02	0.03	"
8	363.21	363.11	11	3	0.03	0.05	0.10	"
9	-	358.00	0	2	-	0.01	-	草地
10	-	356.82	0	3	-	0.03	-	舗装道路
11	368.24	368.16	9	3	0.03	0.02	0.08	未舗装道路
12	374.53	374.54	13	2	0.06	0.07	-0.01	"
13	386.01	386.07	11	7	0.04	0.07	-0.06	"
14	382.53	382.57	17	6	0.02	0.08	-0.04	"
15	377.33	377.46	7	7	0.03	0.04	-0.13	"
16	368.69	368.88	12	8	0.08	0.10	-0.19	"
17	364.16	364.40	8	7	0.03	0.14	-0.24	"
18	342.68	342.02	1	3	-	0.04	0.66	草地
							0.03	平均値(m)
							0.21	標準偏差(m)

表 2 比較一覧表（薄別川調査地）

比較地点	標高(m)		データ数		標準偏差(m)		較差(m)	備考
	小形無人ヘリ	航空レーザ	小形無人ヘリ	航空レーザ	小形無人ヘリ	航空レーザ		
1	338.40	338.29	7	3	0.04	0.02	0.11	未舗装道路
2	335.80	335.74	6	3	0.02	0.02	0.06	裸地
3	331.64	331.40	9	3	0.01	0.01	0.24	裸地
4	318.97	318.63	5	4	0.02	0.01	0.35	裸地
5	342.77	342.79	12	2	0.04	0.01	-0.02	未舗装道路
6	370.50	370.39	5	2	0.04	0.02	0.12	"
							0.14	平均値(m)
							0.13	標準偏差(m)

(2) LP データを使用した斜面変動箇所把握と危険度評価指標の検討

無人ヘリにて LP データを得た白井川の調査地については、有人セスナ及び無人ヘリによる LP データより 2 m のグリッドサイズの DEM を作成し、差分を求めた(図 2)。2 m の DEM を採用した理由は、計測による誤差を 1 m DEM より抑えることが出来ると考えられたことによる。数メートルの地形変化があるとされた箇所は、現地でも地すべり土塊の移動を示す林冠のギャップや、樹木の幹のまがり等が見られた。

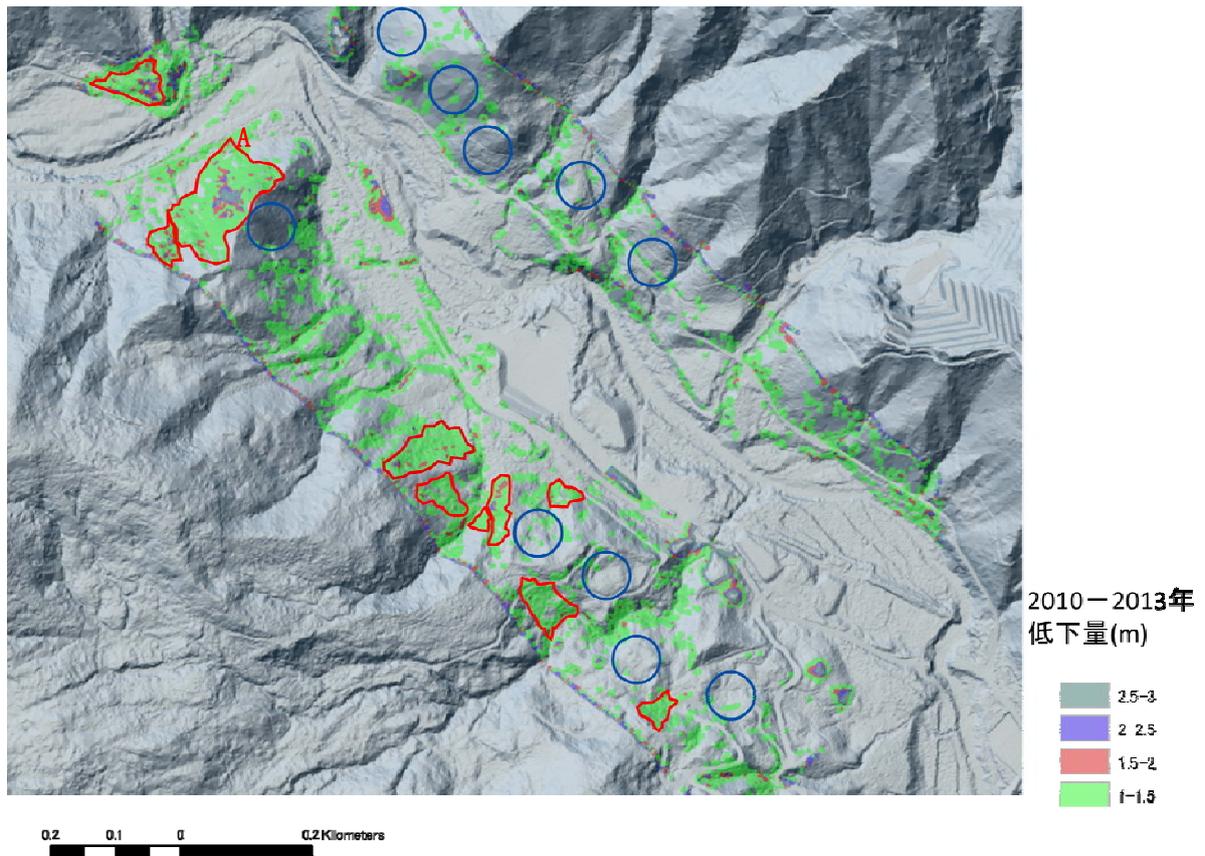


図 2 白井川調査地で 2010 年から 2013 年までに 1 m 標高が低下したとされた箇所。赤枠を変動のあった斜面、青枠 (20 m²) を変動が少なかった斜面、として地形解析に選択



写真 2 図 2 中の斜面 A で撮影。ギャップや樹木の成長の仕方、幹の曲がり具合より変動があった斜面と現地で判断された。

標高に変化のあった斜面の地形的特徴を示す為に、2010年の航空レーザー測量データから得られた2m DEMを用いて固有値比と斜面勾配を求めた。固有値比は地表の粗さを示す指標であり、斜面勾配とともに地すべりの活性度を示すことが出来るとの報告がある（土木研究所資料、平成21年）。ここで、変動が見られた斜面として、2010-2013年の間に1m以上低下した箇所を抽出した（図2）。また比較の為に、変動の見られなかった斜面を選び（図2）、それぞれ固有値比と斜面勾配を計算した。その結果、変動の見られた斜面は、2010年の時点で相対的に地表が粗かったことが分かった（図3）。図3で示された関係から、斜面に変動のあった箇所は、

斜面勾配：25-35°、固有値比：3.5-5、および
 斜面勾配：35-50°、固有値比：4-5.5

を満たすとした。これらの条件を満たす箇所を茶色のセルとして表したのが、図4である。図から、これらの条件を満たす箇所は、変動のあった斜面と一致することがわかり、セルが集中する箇所ほど、地すべりの移動の危険が高いことが示唆された。

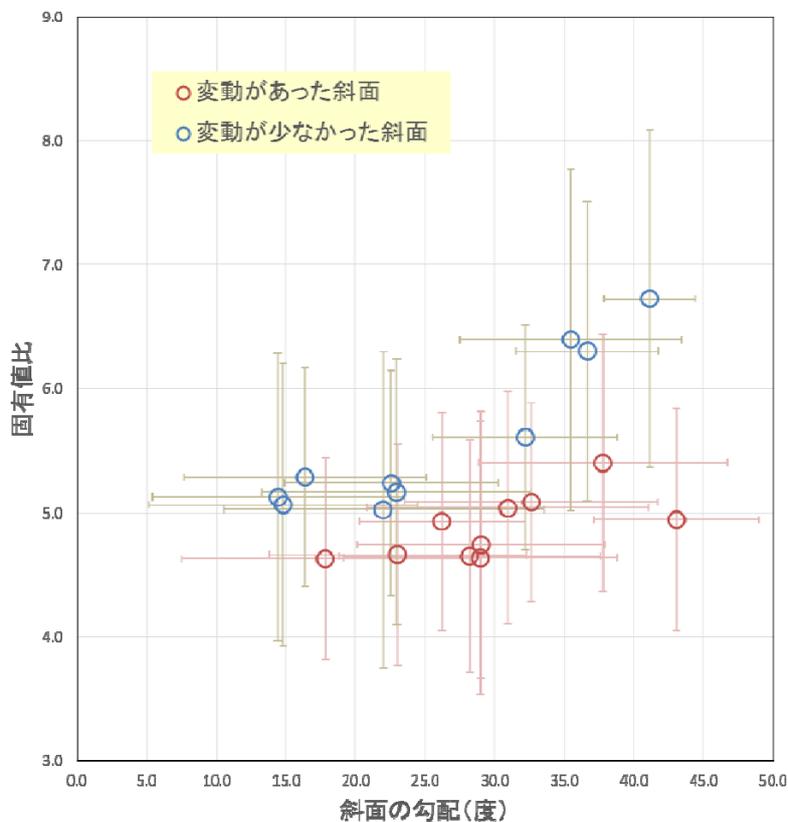
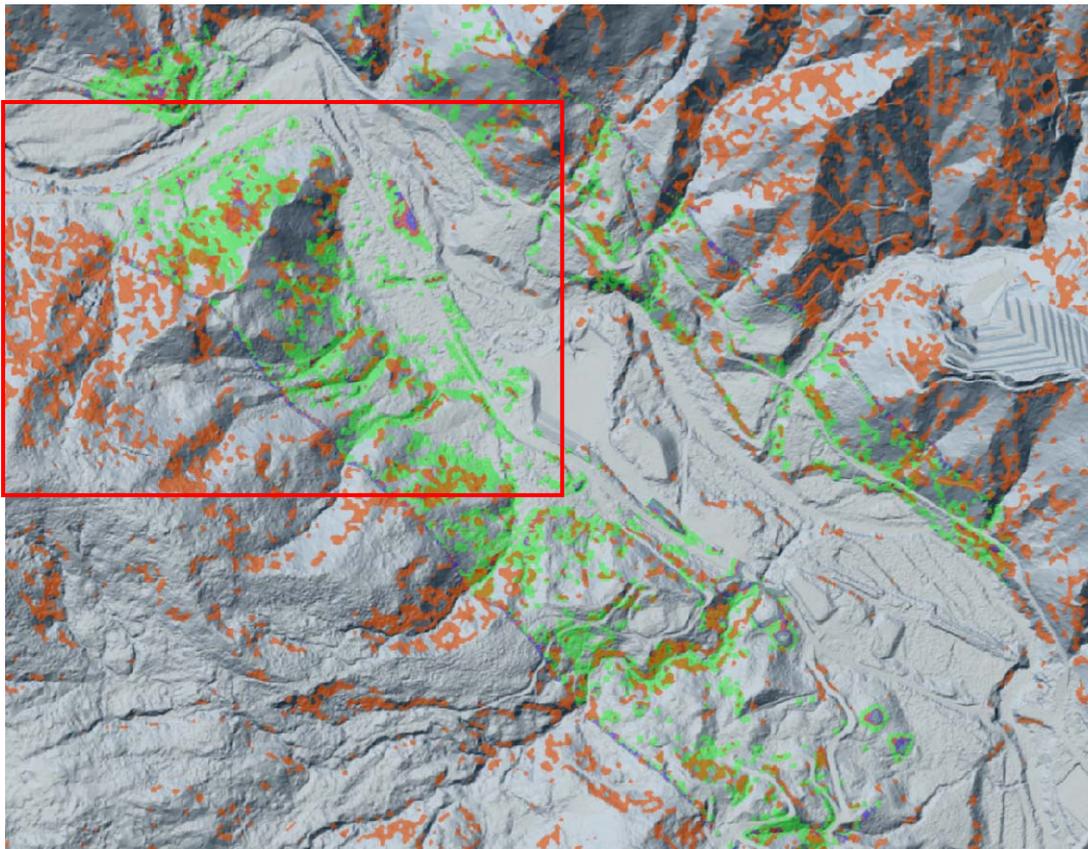


図3 変動があった斜面及び少なかった斜面での勾配と固有値比。平均値と標準偏差を示す。



0.2 0.1 0 0.2 Kilometers

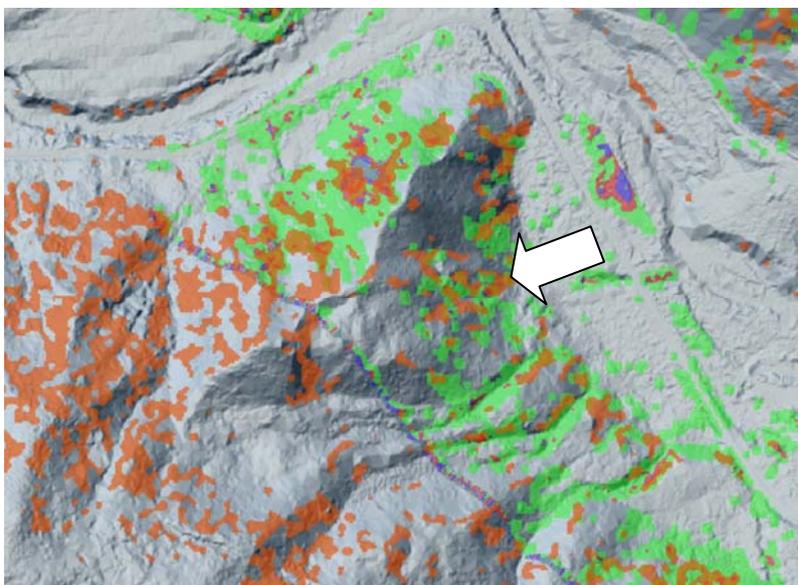


図4 図2上に変動が見られた斜面の特性範囲（斜面勾配：25-35° 固有値比：3.5-5、及び斜面勾配35-50°、固有値比4-5.5）をもつ箇所を茶色で示す。下は上図の赤枠で囲った部分の拡大図。矢印で指す変動斜面は解析対象斜面として選出しなかったが、特性範囲を持つ箇所であったことが分かる。

以上より、無人ヘリに LP (SkEyesBox MP-1) を搭載した実証実験を実施することで、以下の点が明らかになった。

- 過去に取得された LP データとの標高差を見ることで、斜面の動態を量的に把握することが可能
- 固有値比と斜面勾配から、斜面が変動している可能性が高い箇所を推定・抽出することが可能

無人ヘリの運用は、飛行箇所や運航条件に制限が大きい。そこで、まず既存の LP データを用いて固有値比と斜面勾配を求め、斜面の移動の可能性が高い箇所をしぼるとともに、その箇所に飛行が可能かチェックすることが必要となる。現地調査にて斜面の変動が大きいと確認されれば、無人ヘリを用いて定期的に斜面の動態を監視することも考えられる。

(3) 無人ヘリコプター搭載型 SAR 計測

北海道開発局の無人ヘリには、搭載可能重量 (10 kg) と、搭載スペース (450 × 300 × 170 mm)、供給電力 (12V・5A) に制約がある。そこで本研究では、重量 (約 1 kg)・寸法 (160 × 190 × 120 mm)・電力 (消費電力 15 W) の搭載条件から米国 ImSAR 社の NanoSAR (写真 3) を選択した。NanoSAR の主な仕様を表 3 に示す。また計測の条件を、表 4 に示す。無人ヘリに SAR を搭載した実証実験を、2013 年 9 月 6 日に薄別川調査地にて、9 月 24 日に白井川調査地にて行った (図 5)。

表 3 NanoSAR 仕様

機材名	NanoSAR A	備考
メーカー	ImSAR社 (米国)	
消費電力	15W	UAVから給電
最長観測距離	2km	斜距離
計測幅(FOV)	40度	
画像解像度	0.6~5.0m	電波の占有帯域に依存する
中心周波数	10.125GHz	利用に際して総務省への折衝と実験無線局申請が必要
占有帯域	250MHz	
空中線電力(出力)	1W	

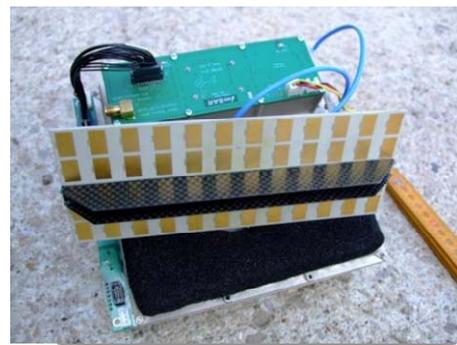


写真 3 NanoSAR

表 4 計測の条件

撮影方向	進行方向左側
オフナディア角	45 度
偏波	HH
飛行速度	10m/秒
測位方式(小形無人ヘリ)	NanoSAR 本体に内蔵した GPS による単独測位



図5 NanoSAR データ取得箇所

薄別川調査地で実施した計測を、以下に詳しく示す。計測は GPS 衛星の配置状況を考慮し、衛星数 5 個以上、PDOP が 3 以下となる条件で実施した。飛行コースは図 6 に示す通りである。薄別川調査地では、対地高度と飛行速度を変えた際の SAR 画像の違いを比較した。概要を表 5 に示す。各フライトで取得された SAR 画像例を図 7 に示した。

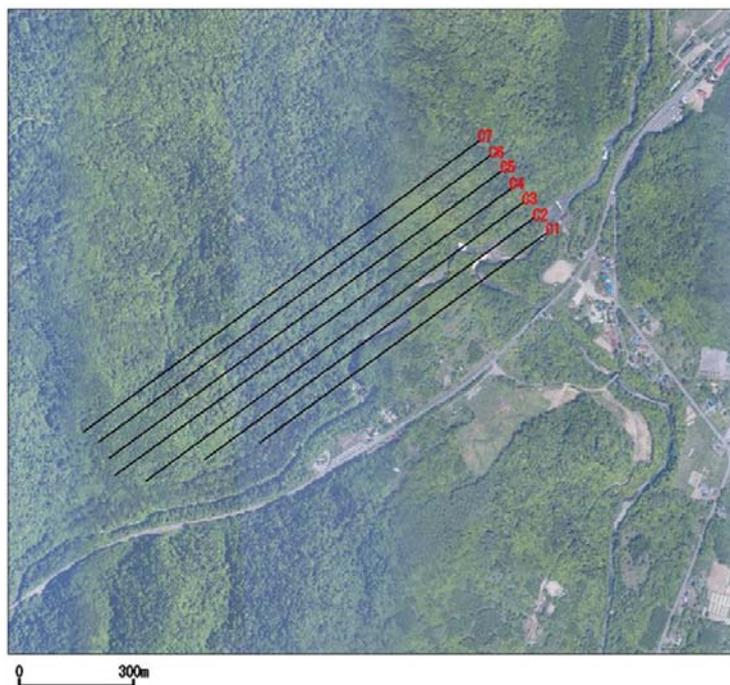


図 6 薄別川調査地 SAR 実証実験での無人ヘリ飛行コース。フライトは、対地高度や飛行速度の条件を変え、4 回に分けて行われた。

表5 各フライトのコースと対地高度と飛行速度

フライト	コース	方向	対地高度(m)	飛行速度(m/sec)	
1	1	SW-NE	150	10	
		NE-SW			
	2	SW-NE			
		NE-SW			
	3	SW-NE			200
		NE-SW			
4	SW-NE	200			
	NE-SW				
5	SW-NE	200			
2	5	SW-NE	220	10	
		NE-SW			
	6	SW-NE			
		NE-SW			
	7	SW-NE			
		NE-SW			
	1	SW-NE			200
		NE-SW			200
SW-NE		150			
NE-SW		150			
3	1	SW-NE	100	10	
		NE-SW	100		
		SW-NE	60		
		NE-SW	60		
		100	SW-NE	100	5
			NE-SW		5
			SW-NE		15
			NE-SW		
4	6	NE-SW	220	15	
		SW-NE			
		NE-SW			
		SW-NE			
		NE-SW			



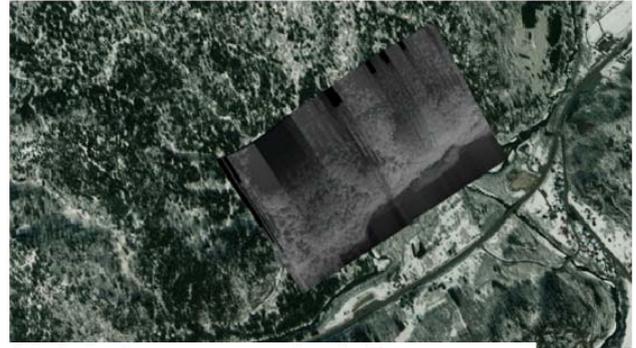
対地高度60 m、飛行速度10 m/sec



対地高度100 m、飛行速度5 m/sec



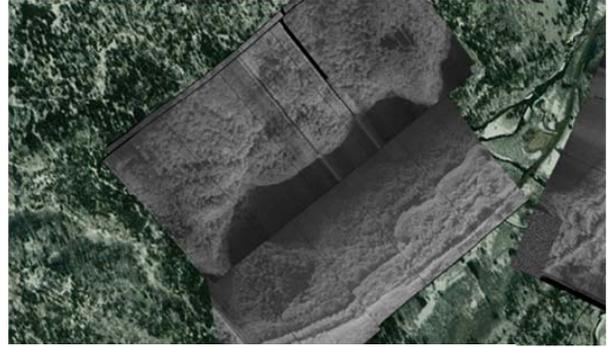
対地高度150 m、飛行速度10 m/sec



対地高度100 m、飛行速度15 m/sec



対地高度200 m、飛行速度10 m/sec



対地高度 220 m、飛行速度15 m/sec

図7 薄別川調査地での NanoSAR 計測例

実験を行うことにより、SAR 計測では、フライトコースよりも 300-500 m 側方まで画像がとれることが分かった。また、崩壊による裸地などを識別できるに十分な解像度をもつ画像がとれることも、図7より分かる。対地高度が 150 m 以上、飛行速度が 10 m/s より速いケースで、データの欠損が少ない画像が取得できた。飛行高度を低くし、かつ速度を速くすると、ヘリコプターの安全装置が作動して運航速度が変化し、欠損の多いデータとなった。

今回の実証実験は、本邦で初めて NanoSAR を無人ヘリに搭載して計測したことで、その意義は大きい。SAR の大きな利点は、悪天候で見通しの利かない条件でも、地表の状態を把握する為の画像を取得できることにある。開発局所有の無人ヘリは悪天候では飛行できないものの、本実験結果は、将来悪天候でも安定して飛行できる UAV に NanoSAR を搭載する際の参考資料となると考える。

(4) 無人ヘリコプター使用による現地状況把握と危険度評価の作業要領案提示

実証実験を通じ、無人ヘリコプターに搭載する計測/撮影機器について、以下の点が明らかになった。

LP

地形を高密度で精度よく計測出来る。また既存の LP データと比較することで、地形の変化を量的に把握することが出来る。しかし機材が 11 kg と重い為に、無人ヘリに搭載して計測する際には、飛行可能な箇所が限られる。

Nano-SAR

SAR の最大の利点は、夜間や悪天候でも地形の状況を把握できることである。また機材が軽いこと、飛行コースの側方のデータを取得することにより、LP を用いるよりも広範囲で地形の状況を把握することが出来る。現状で最大の課題は、使用電波について無線局免許の取得が必要であることであり、電波によっては、実際に取得できるデータの解像度を妥協せざるを得ない。また使用にあたっては、既存の電波利用者との間で電波干渉に関する調整を行う必要がある。利用時には、無線技士の資格者も必要となる。SAR の画像取得にあたっては、高速で安定した飛行を高い地上高度から行うことが望ましい。悪天候でも飛行可能な、小型飛行機タイプの UAV に搭載してデータを取得することで、SAR の利点が発揮できると考えられる。

実験で用いた無人ヘリコプターについては、運用について以下の長所と短所があると考えられる。

長所

- ・天候や見通しの利く場などの条件が揃えば、地上より 150 m の高度まで斜面の起伏の計測や観測を行うことが出来る。すなわち、ピンポイント的に地形の変動を捉えることに適している。
- ・現在よく用いられるようになってきているプロペラ型の UAV と比較してペイロードが大きい為、地表の測量が可能な LP を積載することが出来る。
- ・有事に即時に現場状況を把握したいのであれば、LP 画像取得まで数時間しか要さないという迅速さ、また平時であっても対象斜面を継続的に計測できるという利便性が利点である。

短所

- ・無人ヘリのスペック上、雨・風・雪の荒天時でのデータ取得は困難である。悪天候で測定不能であった場合について、即座に次回の計測日を設定できるような足回りのよい運用システムへの改善が、特に有事の際の運用を考慮した場合には必要になってくる。
- ・機材のペイロードが増えると燃料を減らさざるを得ず、重い機材を搭載しての計測では、標高の高い地域では地上より 150 m まで高度を上げてデータを取ることが出来ない。
- ・無人ヘリは自律航行も可能であるものの、現時点では、見通しのよい場所のみの運用に限られる。しかし安全性を考慮すると、現行のオペレーターによる作業が現時点では妥当であるとも考えられる。

無人ヘリの運用場所の選択には、以下の条件を考慮した上で、運用場所を絞る必要がある。

- ・見通し
- ・目的箇所計測の為に必要な地上高度を確保できるか
- ・基地局及び離発着のスペース確保
- ・住宅地や道路などの人通りのある箇所をさけること

以上の結果より、開発局所有の無人ヘリコプターの作業要領案を以下にまとめる。

平時

有事の際に優先的にチェックすべき場所を絞り込む。ワークフローを以下に示す。

1. 既存 LP データ解析及び過去の崩壊履歴より、危険箇所をしぼりこむ。
2. 実際に現地へ行き、危険箇所の現状を把握する。
3. 実際に危険とされた箇所については、有事の際にも無人ヘリの飛行が可能な場所か、チェックする。

4. 危険が高いと判断され、また飛行が可能な場所であれば、無人ヘリを用いて LP データ及び写真データを定期的を取得する。

有事

平時に危険箇所と認識され、また飛行が可能な箇所であれば、迅速に、写真データと LP データを取得し、斜面の状況の把握と測量を行う。また既存 LP データがあれば、斜面の変動量も求める。

有事後

継続的に崩落斜面周辺の LP 計測および写真撮影を行い、再移動の予兆がないかチェックする。

なお平時と有事の際では、要求される LP データの精度と、データ処理・解析の時間に対する優位順が異なる。例えば有事の際では、詳細かつ正確なデータよりも、迅速さがまず求められる。一方で、平時の際に求めるデータには、精度の高さが要求される。そこで、平時と有事に実施する LP 計測の際の GPS 観測およびデータ処理の使い分けについて、表 6 に基づき、以下を提案する。

平時

- ・電子基準点を利用する GPS 観測
- ・マニュアルフィルタリング

有事

- ・現地に基準用 GPS 受信局を設置する GPS 観測
- ・自動フィルタリング

表 6 LP データ処理の所用時間

処理方法	概要	解析に要する時間	精度	LP データの種類
GPS 観測				
1	現地に基準用 GPS 受信局を設置する場合(ヘリと基準用 GPS のキネマティック解析)	飛行後 20~30 分間 (VRS 等で、別途基準用 GPS 受信局の座標を求める必要がある)	±5cm 程度	点群データ
2	電子基準点を利用する場合(ヘリと電子基準点のキネマティック解析)	電子基準点のデータ公開まで1時間 ダウンロードとキネマティック解析に更に1時間	±数 cm (1 よりも若干良い程度)	点群データ
LP データの地物分離処理				
1	自動フィルタリング+グリッドデータ作成	1 時間程度 (点群データを処理するための比較的高速な PC が必要)	フィルタリング結果に不具合が残る可能性がある	点群データ DEM DSM
2	マニュアルフィルタリング+グリッドデータ作成	確認作業等を含めて1日程度 (点群データを処理するための比較的高速な PC と、経験を積んだ作業員が必要)	目視による点検で不具合最小限にできる	点群データ DEM DSM

⑦今後の課題・展望（本技術研究開発で得られた成果を踏まえ、成果のさらなる発展や砂防行政への活用に向けた、今後の課題・展望等を具体的に記載ください）

UAV（無人航空機）の地形計測分野への活用が国内外で注目されている。UAVは有人航空機より安価に飛行が出来、現地調査を行うよりも広い面積が短時間で計測出来る。本研究では、北海道開発局所有の無人ヘリコプターにLPとNanoSARを搭載し、地すべり計測へのUAVの有効利用について研究を行った。特に無人ヘリコプターにNanoSARを搭載した計測は本邦では民間で初めての試みであった。この地域課題から得た主な結果を、以下にまとめる。

- ・LP計測を同箇所でも数度行うことにより、活動している地すべりブロックの位置を特定できた。この結果から、UAV搭載型のLP計測は地表変動の把握に非常に有効であることが分かった。
- ・活動している地すべりブロックの地形的特徴を固有値比と斜面勾配を組み合わせることで、レーザー測量データ解析によって地すべり危険斜面を抽出する手法を提案した。
- ・NanoSARは、電波法の制限の為に、得られるデータの解像度はLPほど高くはない。しかし広範囲をカバーできる為、将来的に悪天候でも飛行可能なUAVを用いれば、大規模災害が発生した際に変動箇所を把握するための即戦力になる。解像度を出来るだけ上げるため、高い高度で一定の高速度での飛行が求められる。

本研究では活動している地すべりブロックの位置を特定できた一方で、その動態までデータを用いて把握し、予測するまでは至っていない。LP計測を引き続き行い、孔内傾斜計や伸縮計などの地上での計測機器データと組み合わせることで、LPデータを用いたブロックの移動量と変位の方向の求め方を将来的には提示することが出来るようになる。またその際に、ブロックの活動を示す微地形の特徴もより明確にすることで、新たに観測の対象としたり、対策を施したりすべき地すべりを抽出する手法を確立できると考える。

UAVによる計測は、噴火や火山のガス噴出等によって立入禁止になりやすい火山山麓でも有効である。火山山麓にてUAV計測を定期的に行い、降灰やガリーの発達による地形変化を的確に把握することが出来れば、そのデータや知見は土石流の規模や氾濫範囲のシミュレーションや、住民避難や緊急減災工事実施の検討に使用できる。

現在、UAVにデジタルカメラを搭載することで、ステレオ画像から3次元座標を得る計測も多くなされるようになってきた。しかし砂防の分野では、森林下の地表を出来るだけ正確に計測して斜面の状態を把握することが、将来の変動を予測して適切な対策を行う上で、より有用である。この点でUAV搭載型LP計測に関する研究を今後も推進すべきと考える。研究を進めることで、UAV搭載型LP計測に関するノウハウが蓄積・整理され、起こり得る様々な状況に対応したUAV調査計画が立てられるとともに、UAV計測を災害対応の全体スキームの中に有効に組み入れることが出来る。