

無人ヘリコプターによる航空レーザー測量とそのデータの活用について



かさい みお
笠井 美青

北海道大学大学院 農学研究院 流域砂防学研究室 准教授

本トピックでは、北海道開発局と共同で進めている、無人ヘリコプターによる航空レーザー計測に関する研究について紹介します。UAV（無人航空機）やドローンという言葉も、最近では、DJI社のファントム等の小型ドローンの爆発的な普及で身近になりました。北海道開発局が所有する無人ヘリコプター（ヤマハ自律航行型無人ヘリコプター RMAXG1、**写真-1**）は、全長が3.63m、全幅が1.08mと小型ドローンと比較するとかなり大きく、運行には専属のオペレーターや移動基地局（**写真-2**）が必要となります。そのため、小型ドローンほど簡単に計測を実施することができませんが、計測範囲は広く、飛行の安定感も抜群であるといえます。無人ヘリコプターで航空レーザー測量を実施する際には、機体の下部にレーザースキャナーを設置します（**写真-1**）。ヘリコプターの尾にはGPSアンテナも搭載されています（**写真-1**）。

1. 無人ヘリコプターの飛行

無人ヘリコプターは、移動基地局と操作系無線を接続した状態で飛行します。飛行経路の変更や、無人ヘリコプターに搭載しているカメラの操作も、基地局からの通信により随時可能です。この無線通信については、データ通信では2.4GHz帯、カメラ映像についてはアナログの1.2GHz帯を使用しています。自律飛行が可能なヘリコプターではありますが、安全面から目視内飛行としており、飛行にはアンテナの操作者とヘリコプターの目視

監視員が必要です。アンテナとヘリコプター間で安定した通信を維持するために、昨年からは高所作業車を導入して、アンテナを樹木帯より高所に設置することにしました（**写真-2**）。この際、アンテナが取り付けられた作業台で、アンテナ操作者と目視監視員の2名が見通しを確保しつつ作業することにより、1日に数キロメートルにわたる広範囲の測量がスムーズに実施できるようになりました。

無人ヘリコプターの最大搭載量は標高0mかつ気温20度の場合は10kgまで可能となっていますが、搭載量が5kg程度であれば、標高1300mでの飛行実績があります。飛行範囲は基地局から半径最大5kmで、最高速度は72km/hです。対地高度は150m以下となっています。最近の計測では、50-70mの対地高度で3-5m/sの速さで飛行しています。無人ヘリコプターが飛行できない条件としては、降雪時、雨量が5mm/hもしくは地上風速が10m/s以上、気温が-10℃よりも低い場合、飛行高度と同距離の半径に人間が確認できる場合です。もちろん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でも飛行できません。

2. 地すべりの計測

近年は、全国でレーザー測量データの蓄積が進んでいる地域も増えてきました。時期を異にして取得されたデータを用いて地形変化を把握するにあたり、溪流の場合は各データより作成されたDEM（数値標高モデル）



写真-1 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）。機体の下側にレーザースキャナー、尾にGPSアンテナを搭載



写真-2 移動基地局および高所作業車
（提供：日本工営株式会社 早川智也氏）

表-1 レーザースキャナーのスペックの比較。図1と2で用いたレーザースキャナーは、B(旧)タイプ。

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

から同じ場所の標高差分を求め、侵食場や堆積場、およびそれらの量を推定することが通常行われています。しかし斜面の場合は、植生が繁茂していることや、地面に傾斜があることで、測量で地上に到達するレーザーの点も、渓流と比較すると一般的に少なくなります。従って、DEMの値が実際の標高と異なっていることも渓流より多くなり、単純にDEMの差分から地形変化量を求めることは難しいように思います。そこで、時期を異にして取得された航空レーザー測量データを解析して、活動的

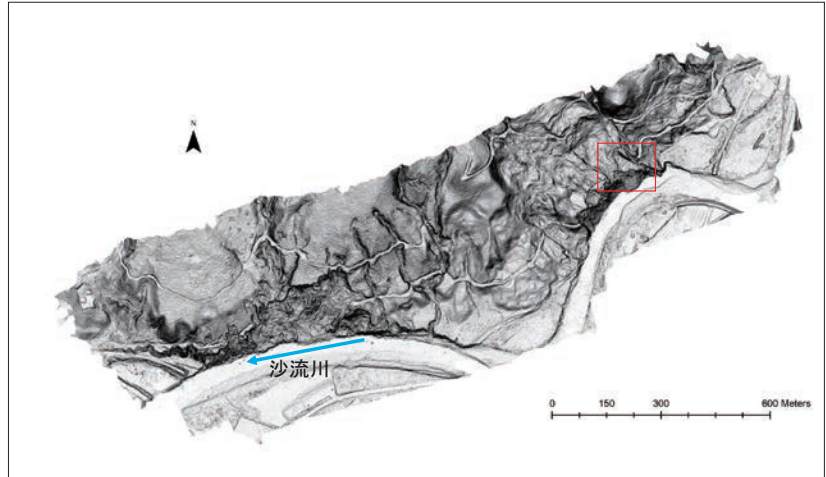


図-1 岩知志地区。
平成27年10月取得の航空レーザー測量データより作成

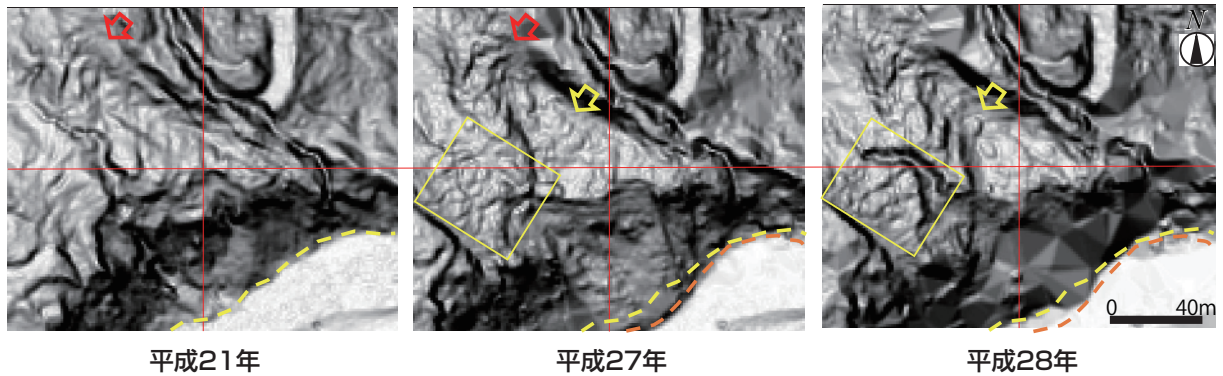


図-2 図1中赤枠で囲った部分の地形変化

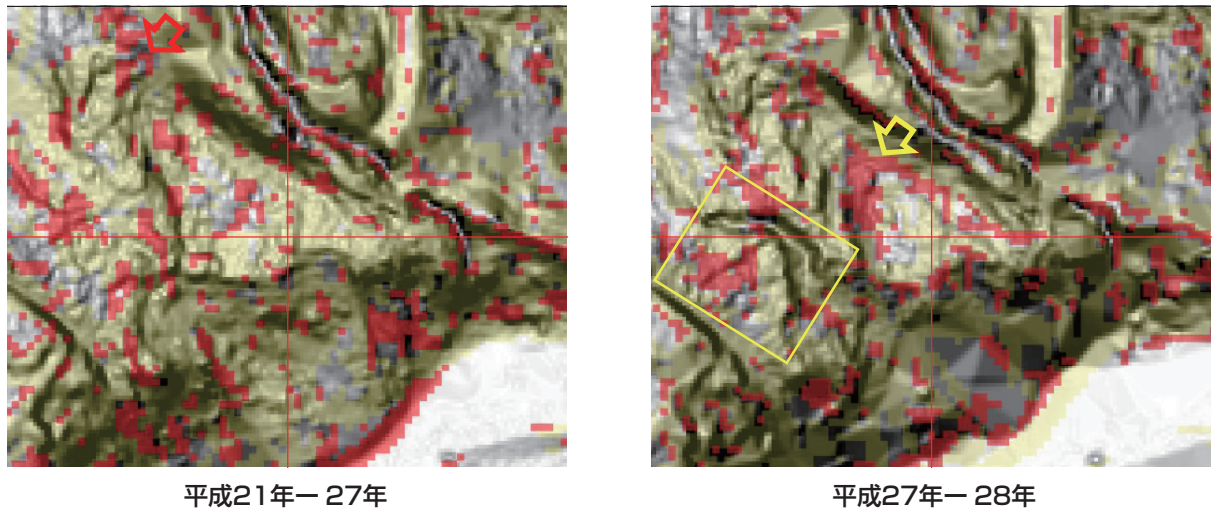


図-3 各測定年間の固有値比の変化。平成27年(左)および平成28年(右)の地形を背景にのせる。黄色は平成21年(左)もしくは平成27年(右)に固有値比が2.5から5を示す箇所、赤色は、平成27年(左)もしくは平成28年(右)に新しく固有値比が2.5から5を示した箇所。

な地すべり斜面を抽出する試みを、北海道沙流郡平取町岩知志地区を流下する沙流川の右岸沿いを対象に進めています(図-1)。計測範囲には蛇紋岩が広く分布し、年間に数メートルは移動する大変活動的な地すべりが存在します。無人ヘリコプターによる計測は、平成27年と28年の落葉期に実施しました。使用したレーザースキャナーのスペックは表-1(Bタイプ)に示す通りです。この一帯では、平成21年に、北海道開発局による有人飛行による航空レーザー測量も行われています。その結果も一緒にして、地すべり斜面の一部(図-1:赤枠)について、その地形の変化を図-2に示します。この斜面は、図-1に示すように沙流川の攻撃斜面にあたり、特に地すべりの移動が激しく起こっている範囲になります(関根、2016)。図-2では、地すべりが沙流川に張り出したあと(黄色破線:平成21年脚部、橙色破線:平成27年脚部)、斜面脚部が再び浸食をうけた様子を見ることが出来ます。また、土塊の下方への移動に伴って、滑落崖が発達したこと(赤矢印)、斜面脚部の侵食により、平成27年から28年の間に急速に亀裂が形成されたこと(黄矢印)も分かります。黄色の枠で囲まれた範囲では、その間に明瞭な小沢ができ、その西側では亀裂の形成がより進行していることも見て取れます。

地すべりの活動度を推定するには、土塊の移動にともなって形成される亀裂などの微地形の分布の変化を把握することが重要ですが、微地形を地形判読から抽出する作業は、広範囲を対象にすると多大な労力を要します。また作業者の主観は、少なからず判読結果に反映されます。そこで、客観的かつ広域に活動的な地すべりを抽出する手段として、地表の粗度を表す指標である固有値比を利用して斜面を解析する手法を調べているところです。既存の研究では、「固有値比の値が2.5から5をとる箇所では、亀裂や段差が発達している場合が多い」、との報告があります(土木研究所、2009)。そこで図-2で示した範囲にて、平成21年および27年に取得されたデー

タから作成した2mのセルサイズのDEMを用いて、固有値比が2.5から5をしめす箇所を図-3に黄色で表します(左:平成21年、右:平成27年)。次に、左図では平成27年に、右図では平成28年に、新たに固有値比が2.5から5を示した箇所を赤色で表します(図-3)。ここで、実際に図中の赤矢印、黄矢印、黄枠の部分を見ると、亀裂の出現は、この赤色で表される箇所として上手く表現されていることが分かります。

以上から、地すべりが多発する地帯では、このように固有値比が2.5から5の値が新たに出現する箇所が集中する斜面に、活動的な地すべりブロックが存在するのではないかと考えています(笠井、投稿中)。ただし、標高データを解析する際には、測量やデータ処理の際に生じた誤差なども考慮する必要があり、この研究はまだ現時点では発展途上の段階にあります。今後も研究を進めていくことにより、地震などで広範囲にわたり斜面が攪乱された地域についても、亀裂の発生およびその後の拡大の状況を迅速に把握するために活用できる手法として、いずれは提案していきたいと考えているところです。

3. 荒廃渓流の定期計測

次に、平成28年秋より始めた荒廃渓流の定期計測について紹介します。北海道日高山脈の東側に位置する十勝水系の渓流は、平成28年8月29日から31日にかけて接近した台風第10号によってもたらされた豪雨により、河床が土砂で覆われ、川の様相は一変しました(図-4)。斜面には大きな崩壊は多くは発生しておらず、流域の主な土砂生産源は、周氷河性崖錐堆積物や、河道内に存在していた段丘堆積物、氾濫原と考えられています(小山内ほか、2017)。なお図-4では、水系を通じて河床の拡幅が甚大に起こったようには見えますが、実際には、豪雨以前に植生に覆われていた段丘堆積物の上を、土砂が薄く堆積しているような箇所も多く見受けられます。また、この水系は、豪雨以前は未固結の火砕流

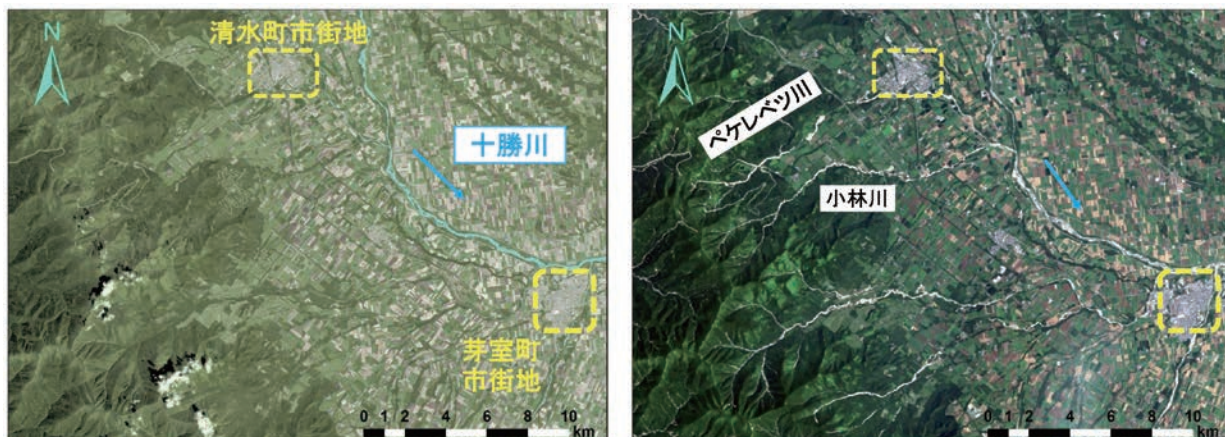


図-4 平成28年8月豪雨前後のランドサット画像(<https://landbrowser.airc.aist.go.jp/landbrowser/>)。左:平成27年8月24日、右:平成28年7月26日

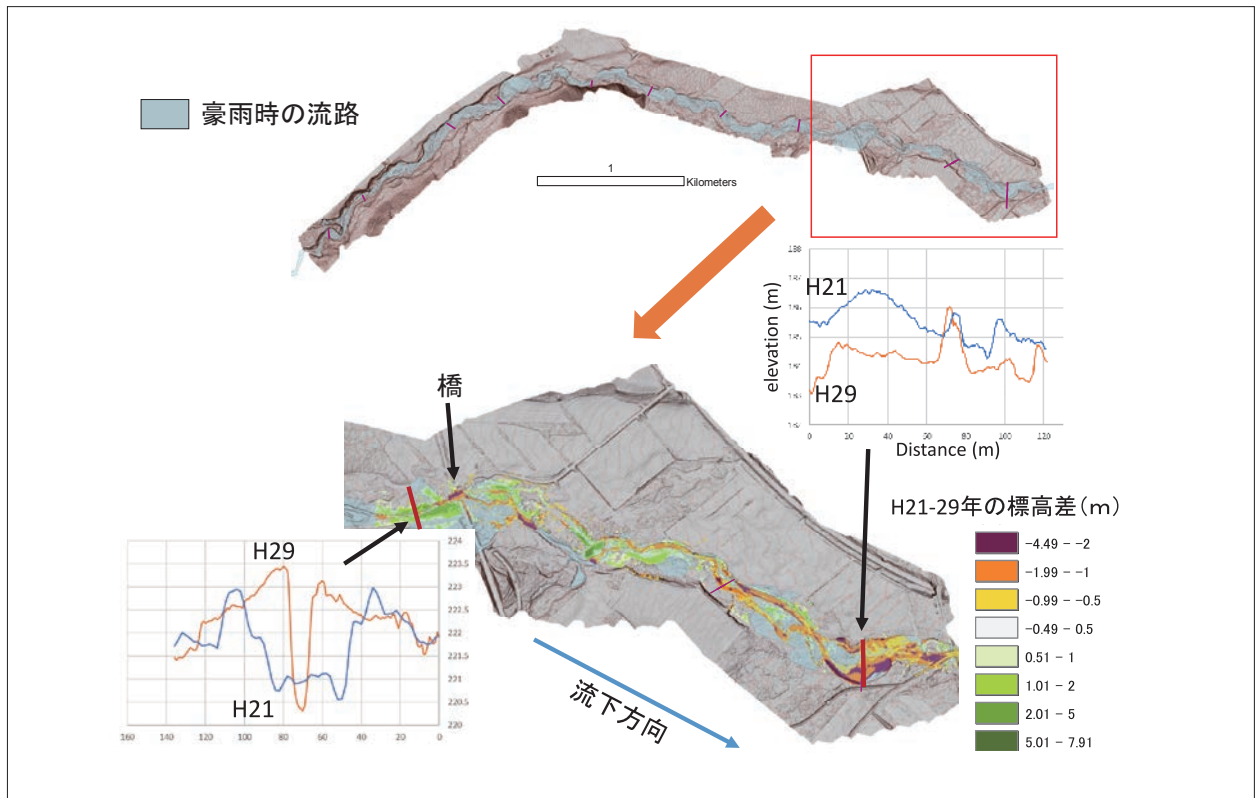


図-5 平成29年に取得したデータより作成した小林川の豪雨後の地形(上)、および平成21年に有人飛行の航空レーザー測量データより作成されたDEM との差分値と横断面図(下)

堆積物を急速に下刻していることが問題となっていました。従って、今後は、豪雨前と同様に下刻が急速に進行していき、以前と同様の景観に戻っていくことも考えられます。一方で、豪雨後には、治山堰堤、砂防堰堤、床固、頭首工などの様々な施設が、溪流に急速に導入されています。そこで、水系を通じて河川地形の変化を定期的にモニタリングしていくために、無人ヘリコプターを用いた航空レーザー測量を、ペケレベツ川では平成28年度、小林川では平成29年度より開始しました。小林川での計測結果を図-5(上)に示します。なお小林川の一部では、平成21年に有人飛行による航空レーザー測量が実施されています。図-5(下)は、両測量のデータから作成されたDEMの差分を示した図で、豪雨による地形変化を示しています。図からは、橋の上流部では、堆積物が3mほどせきあがったこと、またその1kmほど

下流部では、河床が2mほど低下した様子が分かります。平成30年度からは、戸蔭別川の床固導入予定区間でも計測を開始しました。戸蔭別川は国土交通省直轄の河川であり、豪雨以前および以降の航空レーザー測量データが揃っています。計測を継続することにより、戸蔭別川でも砂防施設の復旧や導入の進捗に伴った河川地形の変化を把握することができると考えています。

4. 2種(新/旧型 SkEyesBox)のレーザー scanner を用いた計測値の比較

航空レーザー測量データのユーザーとして、意外に頭を悩ませることとして、地形解析に使うDEMのセルサイズがあります。例えば、セルサイズが小さすぎれば、細かい地形を拾うことはできますが、広範囲を対象にした場合は、解析するデータ量が膨大になります。また、

表-2 4か所の計測地における、異なるタイプのレーザー scanner による計測から作成したDEMについて(左)標高差が0.7m以内である箇所が計測範囲を占める割合(%)、(右)求めた斜面勾配の差が5度以内となる箇所が計測範囲を占める割合(%)

計測地	DEM セルサイズ			
	1 m	2 m	5 m	10 m
A	89	86	56	34
B	78	80	52	43
C	79	69	56	57
D	93	93	82	82

計測地	DEM セルサイズ			
	1 m	2 m	5 m	10 m
A	64	84	87	78
B	53	72	78	81
C	59	75	91	96
D	76	91	91	94

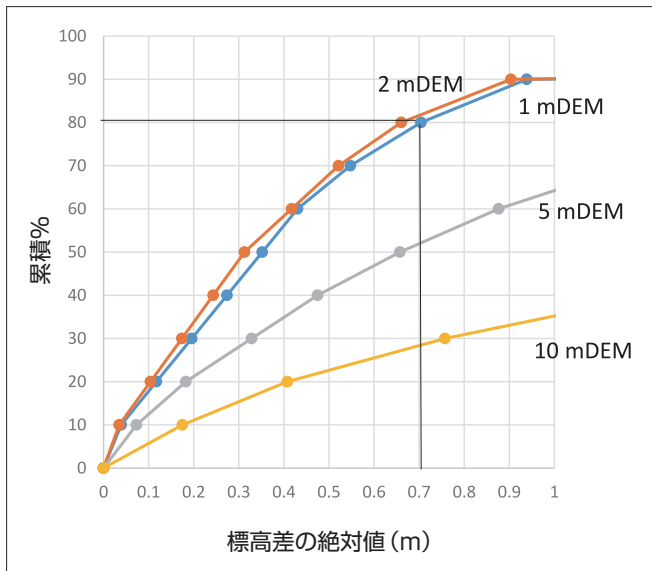


図-6 新旧タイプのレーザースキャナーを用いた計測により作成した、同箇所における各セルサイズのDEMの差と、計測範囲に占める面積の累積割合(表2：A地区)

地形レーザー計測データの検証は、通常は道路などの不動点を用いて行われ、高さ方向の誤差は±15cm程度とされていますが、山腹斜面については、前述の理由で、実際の誤差はこの値よりも大きくなると考えられます。従って、斜面で地形解析を行った場合には、標高値の誤差が、そのまま結果に反映されてしまう可能性も高くなります。一方で、把握したい地形的特徴に対して、大きすぎるセルサイズを用いて解析を行っても、結果として得られた値は余り意味をなさなくなってしまうかもしれません。そこで、解析に適切なセルサイズを調べるために、平成27年の落葉期に、北海道の地すべり地や山地斜面、火山山麓の溪流の4か所にて、無人ヘリコプターに旧型(表-1・B)、および新型のレーザースキャナー(表-1・A)(SkEyesBOXMP-1,SkEyes社)を搭載し、同地区を同日に2度計測する試みを行いました。各計測から得たグラウンドデータよりTINを構築した後、1,2,5,10mのセルサイズのDEMを作成し、セルサイズごとに、同箇所における値を比較しました。もし正確に計測が出来ていれば、このDEMの差は小さくなるはずです。実際には、その差が少なかったのは、2m以下のセルサイズのDEMを用いた時でした(図-6)。それでもやはり、差が15cm以内で収まるのは、各計測範囲のうちの3割の面積にも至りませんでした。一方で、各計測範囲のうちの8割の面積については、1mのセルサイズのDEMの値を比較した場合は各計測地にて、2mのセルサイズのDEMについては計測地Cを除き、70cm以内の差に収まることになりました(表-2左)。この場合、標高差が±70cm以上となった箇所は、計測範囲の縁や、ヘリコプターの飛行方向と直行する斜面もしくはは沢の側壁でした。次に、地形解析値を比較するために、各

DEMより斜面勾配を求めて、同箇所にてその値を比較してみました。(表-2右)に示すとおり、2mのセルサイズ以上のDEMを用いれば、少なくとも計測範囲の7割の面積が、5度以内の差で収まること分かります。しかし10mのセルサイズのDEMを用いる場合は、地表の動きを示す数メートルサイズの微地形の存在が値に反映されなくなる可能性があります。そこで、微地形の特徴を調べる為の解析については、2から5mサイズのDEMを用いることが適当であると考えました。

以上から、山地の斜面を対象にした航空レーザー測量のデータを用いる場合は、2mのセルサイズのDEMを用いることが望ましいのではないかと考えているところです。ただし、この結果は他の種類のレーザースキャナーを用いて検討する機会があれば、また変わってくるかもしれません。

5. まとめ

現時点では、無人ヘリコプターによるレーザー計測は、有人ヘリコプターによる計測よりも簡便であること、また小型ドローンと比較するとその計測範囲の広さや、安定した飛行によりニーズがあるように思いますが、将来は技術の発展により、小型ドローンによるレーザー計測が主流になってくるように思います。無人ヘリコプターを用いた航空レーザー測量を進めていくことで、定期的に地形変化を詳細にモニタリングしていくことに加え、今後も増加すると予測される、異なる時期に取得されたデータの活用方法について研究を進めていきたいと考えています。

なお、ここで紹介した試みは、国土交通省河川砂防技術研究開発公募(地域課題分野)の支援を受けて、北海道開発局の札幌開発建設部と帯広開発建設部と共同で進めてきました。また現在、実際の測量作業には、日本工営株式会社、ヤマハ発動機株式会社、環境開発工業株式会社が携わっています。測量を円滑に進めるために、前述の高所作業車の導入の提案など、色々な工夫や尽力を毎回していただいているお蔭で、様々な試みを実現することができています。測量を重ねるたびに、産官学が連携して研究を進行しているような流れに自然となってきていることを実感しています。

引用

- (独) 土木研究所 (2009)：地すべり地における航空レーザー測量データ解析マニュアル(案)，土木研究所資料第4150号，43p.
- 関根猛 (2016)：河川に隣接する地すべりの活動と脚部の侵食の関係，平成28年度北海道大学農学部卒業論文，18p.
- 小山内信智ほか (2017)：平成28年台風10号豪雨により北海道十勝地方で発生した土砂流出，砂防学会誌，vol.69, No.6, pp80-91.