

写真測量技術による岩盤形状変化の差分解析

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム ○山崎 秀策
日外 勝仁
倉橋 稔幸

自然斜面の安定性の解析、災害発生時の要因解明、岩盤形状や亀裂の計測等が重要である。しかしながら、道路の維持・管理に関わる対象斜面が膨大であるために、安全かつ簡易的な調査技術が求められている。そこで本報告では、デジタルカメラ撮影画像のみを用いた写真測量技術により岩盤斜面の3次元地形モデルを作成することで、斜面に生じた落石・崩壊・堆積などの経時変化を解析した事例を紹介する。点検・調査時に写真測量技術を活用可能な写真撮影を行うことにより、事後的に3次元モデルの作成および解析が可能となり、道路斜面の日常的な点検による斜面安定性の評価や、災害現場の安全かつ迅速な記録が可能となる。

キーワード：写真測量技術、斜面災害、維持管理、岩盤斜面、測量

1. はじめに

道路斜面を対象とする、斜面形状や亀裂など変状要因の調査や落石・崩壊などの履歴調査などは、現地踏査や時期の異なる写真の重ね合わせ、航空測量や光学測量等による斜面形状の計測に基づき、斜面安定性の解析が実施される。しかしながら、道路斜面の調査対象が膨大であるために、十分な数量・精度で斜面形状の解析・安全性評価が実施できていないのが現状であろう。また落石・斜面崩壊・地すべりなどの斜面災害発生直後の復旧においては、二次災害の危険性が伴うことから、安全・迅速かつ簡便な手法による斜面調査法の適用が求められている。

近年、多視点から撮影されたデジタルカメラ画像から特徴点を抽出し、周辺画素を用いた特徴点の特徴量の計算および特徴点のマッチング、カメラ撮影位置および特徴点の3次元座標を精密計算することで、撮影対象の立体形状をモデル化するStructure from Motion (以下、SfM) という手法 (図-1) が登場し、商用あるいはオープンソースソフトウェアとして普及している¹⁾。また、SfMによる写真測量技術は、小型無人航空機 (ドローン、UAV) による空撮と組み合わせることにより、地すべり計測、災害調査、鉄塔・橋梁などの高所検査など幅広い分野での活用が行われている²⁾。しかしながら、写真測量技術を用いて高精度 (例えば、誤差数cm) の地形面情報を取得するためには、作成モデルの歪みを補正するために、撮影対象の内外に適切な数・密度で配置した評定点 (Ground Control Point) を準備・測量し、計算に含める必要がある¹⁻³⁾。評定点を用いた写真による地

形測量としては、「UAVを用いた公共測量マニュアル (案)」⁴⁾ 等により規定されているが、同マニュアルでは評定点の他に、検証点を設置・測量することによる精度検証が不可欠である。また、評定点を設置する代わりに、高精度の測量および姿勢センサー、シャッター時間の記録装置等により撮影時のカメラの位置・姿勢を精密に計測することで、モデルの作成精度を向上させる手法³⁾ もあり、地形測量などへの適応事例が増えている。ただし、日照条件などが変わらない様に短時間で撮影を

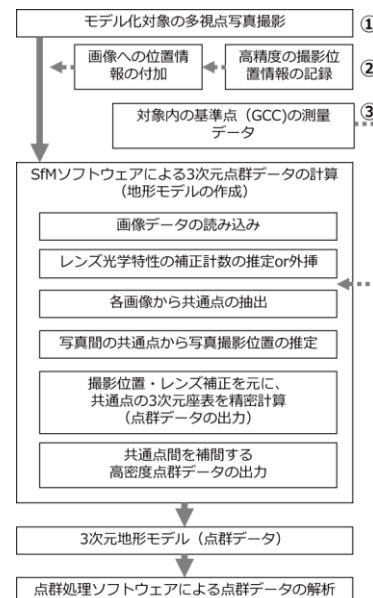


図-1 SfMによる3次元地形モデルの作成・解析フロー。SfMソフトウェアはAgisoft社のPhotoscanを、点群データの解析にはオープンソースソフトウェアCloudCompareを使用した。一般に、モデル作成精度は①<①+②<①+③の順に高くなる。

行うためには、高額なセンサーやシステムが必要であるため、広く普及するには至っていない。そこで本報告では、日常的な活用が可能な調査手法の提案を目的として、デジタルカメラの撮影画像のみで3次元地形モデルを作成し、急崖斜面における斜面崩壊現場を対象に経時変化を解析した事例を報告する。

2. 解析対象

調査対象とした斜面は、北海道日高町に位置しており、2016年8月の豪雨に関連して、高さ約90m、幅80-100mの範囲で古第三系沙流川層の枕状溶岩からなる基盤岩が崩壊、滑落崖の形成により斜面上部に位置していた道路が被災している（写真-1）。崩壊斜面の中央部には落ち残りの岩塊が存在しており、小規模な崩壊・落石や崩壊土砂の流出などが継続して発生している。

崩壊の発生から16日後、69日後、471日後にそれぞれ30分～1時間程度の短時間で撮影した写真画像を用いて、写真測量技術による3次元地形モデルを作成し、崩壊斜面形状の長期的な経時変化の解析を行った。

3. 写真測量手法と3次元地形モデルの出力結果

(1) SfMによる3次元地形モデルの作成方法

写真撮影から地形モデルの出力、解析作業については、図-1の作業フローに従って実施した。解析に用いた写真画像は、崩壊斜面向かって右側に掛かる橋梁上（写真-1、図-2）を側方移動しながら多視点で崩壊斜面を撮影した写真画像を使用した（発生後16日後は斜面左側からの画像も含む）。カメラ位置および点群データ座標の計算・出力は、Agisoft社のPhotoscan（Ver. 1.2.6および1.3.4）を使用した。計算に使用したパソコンは、16日後および69日後のモデルでは、CPUがIntel Core-i7-4600U（2コア4スレッド 2.10 GHz、GPU統合型）、搭載メモリ8GB、OSがWindows 8 pro 64 bitのノート型PCを、471日後のモデルには、CPUがXeon E5-2687W v4（12コア24スレッド、3.0 GHz）、GPUがGeforce GTX 1080（メモリ8GB）、搭載メモリ128GB、OSにWindows 10 pro 64bitのワークステーションを使用した。解析の詳細設定（括弧内は471日後の設定）は、撮影位置の推定・点群の計算における正確度はhigh（highest）、Pair preselection無し（あり）、Key point制限120,000（40,000）、Tie point制限無し（無し）とし、高密度点群の計算は品質high（ultra high）、深度フィルタリングModerate（なし）の設定で実行した。モデル作成に使用した写真枚数は、崩壊から16日後が82枚（焦点距離の異なる写真画像が混在）、69日後が67枚（短焦点18.2mmのみ）、471日後が82枚（短焦点18.2mmのみ）であり、それぞれ約1424万、約842万、約3538万

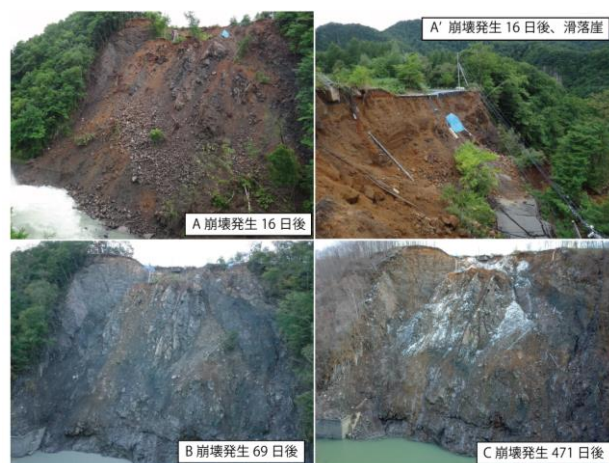


写真-1 調査対象の斜面崩壊現場。河川左岸の急崖斜面が高さ約90m、幅80-100mの規模で崩壊し、斜面上部にあった道路が被災した。

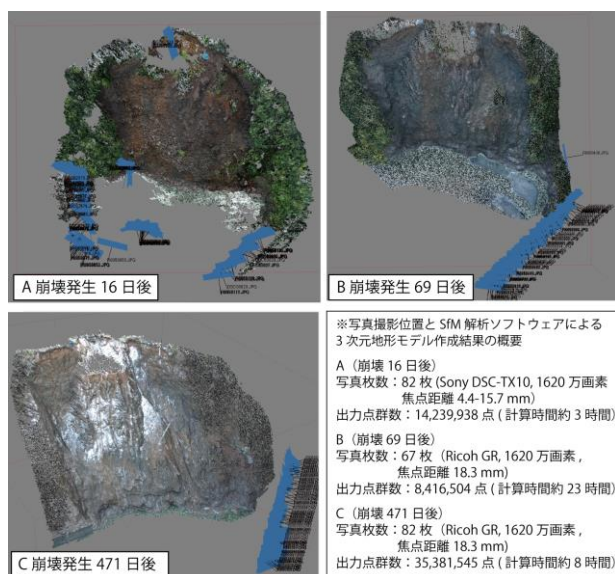


図-2 斜面崩壊発生16日後、69日後、471日後の3次元地形モデルの出力結果と推定された写真撮影位置。

点の点群データが計算された。作成されたモデルはSfMソフトウェア内で、解析対象範囲外の点群データをトリミングした後に、汎用的なLAS形式にて出力した。

(2) 3次元地形モデルの出力結果

出力データは、点群解析ソフトウェアであるCloudCompare（Ver. 2.8.1⁵⁾を用いて、3次元地形モデルの航空レーザー測量データとの重ね合わせ、各モデル間の差分解析を行った。CloudCompareの密度計算ツールの計算から、解析に使用した航空レーザー測量の平均点群密度は 3.7 ± 4.7 点/m²であった。一方で、16日後、69日後、471日後の3次元地形モデルの平均点群密度はそれぞれ、 759 ± 276 点/m²、 496 ± 130 点/m²、 2041 ± 344 点/m²であり、航空測量データに比べて、2桁以上の高密度で斜面形状情報が得られていることが判る。また、写

真測量データによる点群は各点が RGB の色情報を持つため、植生や積雪部などを色情報により識別・フィルタリング可能となる利点がある。

また、3次元モデルの作成結果を見ると、斜面を見上げる形で撮影された写真画像を使用しているため、斜面上部の落ち残り岩塊の表面および側面部が死角となっており、計算された点群の出力結果からもデータが欠損していることがわかる(図-2)。また、撮影条件により斜面の影などで画像黒つぶれ・白飛びがある部分は誤差が大きく、点群密度が低下するため、露出やシャッター速度などカメラ設定条件にも留意する必要がある。通常、地表から急崖斜面で死角なく斜面全体をくまなく撮影することは困難であるため、地表から全景が俯瞰できない対象については、ヘリコプターや無人航空機による撮影が必要であろう。

4. 写真測量による斜面形状の解析結果

(1) 崩壊 16 日後の撮影画像のみでの断面解析

斜面崩壊箇所は河川の急崖斜面に位置しており、斜面へのアプローチが困難であるため、崩壊斜面内に評定点を設置・測量する事が難しい。そのため、作成された点群データには縮尺および方位情報が含まれていない。まず、デジタルカメラによる写真撮影のみで地形モデルを作成し、斜面形状の解析を試みた。

崩壊 16 日後の写真データから作成された点群データの作成結果と、CloudCompare 断面プロファイルの作成位置・解析結果を図-3 に示す。断面プロファイルの抽出には Extract sections ツールを使用した。スケール情報の無い地形モデルからでも、モデル内に人工構造物や水際などがモデル化されていればそれを元に水平面を復元することが可能である。水平面を外挿することで、断面から崩壊堆積物の表面や滑落崖の傾斜角度を読み取り、崩壊堆積物の堆積状況、崩壊すべり面の推定した(図3)。また、崩壊部の縁辺部を崩壊前の元地形として外挿することで、断面プロファイル上で崩壊部、崩壊堆積物の堆積部、落ち残りブロックの形状・位置関係や規模を推定した(図-3)。

(2) 航空測量データとの重ね合わせによる断面解析

対象斜面を含む 2009 年度実施の航空レーザ測量による地表点群データ(北海道開発局より提供)が入手できたため、これを座標・方位の基準とし、CloudCompare 上で航空レーザ測量結果と崩壊 16 日後、69 日後の地形モデルの重ね合わせ(Align:Point pairs picking ツールによる)を行い、断面プロファイルを作成した(図-4)。航空レーザ測量と作成モデルとは点群密度に大きな差があるため、航空レーザ測量結果との重ね合わせ結果には、数 10 cm~数 m 程度の誤差があると思われる。一

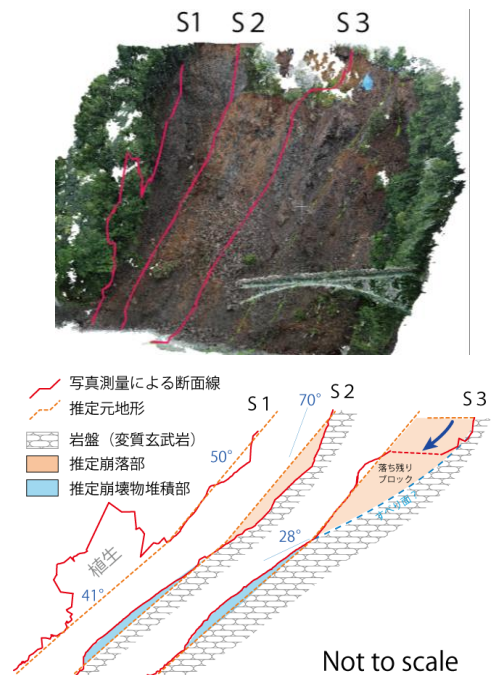


図-3 崩壊 16 日後における、位置・スケール情報を持たない 3次元地形モデルにおける断面作成位置(上)と解析結果(下)。

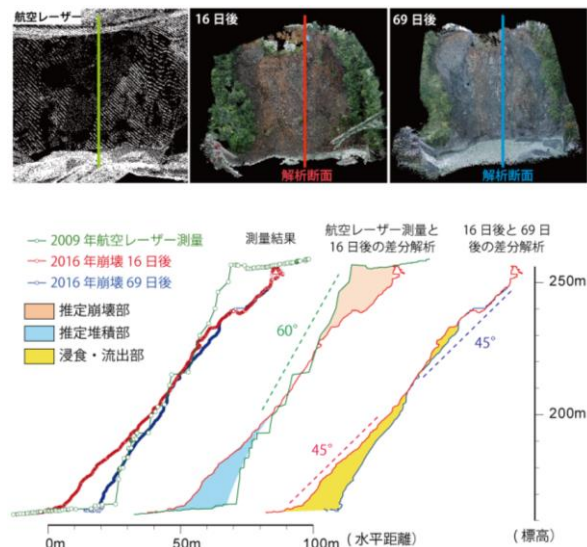


図-4 航空レーザ測量を基準とした 16 日目・69 日目の地形モデルにおける断面解析結果。(上) 左から、航空レーザ測量によるグラウンドデータの点群、16 日目、および 69 日目の写真から作成された点群データと断面作成位置。(下) 断面プロファイルの変遷。

方で、3次元地形モデル間の重ね合わせは、数 cm 程度、最大でも数 10cm 程度の誤差で一致している。重ね合わせの精度は、撮影条件の違いにも左右されるが、一般に同一機材を使用した場合、写真枚数および写真重複率が少なくなるモデル外周部で、より誤差は大きくなる傾向にある³⁾。

航空レーザ測量による崩壊前と崩壊 16 日後の断面プロファイルを比較することで、崩壊面の推定・斜面状

況の変化がより定量的に把握でき、斜面上部の落ち残りブロック（元の斜面上の平面部）の位置関係から、崩壊による垂直移動量が約 15mであったと読み取れる。断面プロファイルを見ると、出力された点群データは、航空レーザー測量による点群データよりも高密度であり、1メートル以下の微細な凹凸や崩壊岩塊の形状が識別可能である。

さらに、崩壊後 16 日目と 69 日目の撮影時期の異なる地形モデル（点群データ）間の差分解析により、斜面形状の変化を視覚化・定量化することが可能となる（図-4）。差分解析結果からは、斜面上部の落ち残りブロックは 69 日経過時においても、計測誤差の範囲内においては安定していると評価される。また、斜面下部に堆積していた崩壊土砂は、崩壊から 69 日経過した時点で河川侵食によりほぼすべてが流出しており、流出後に現れた岩盤斜面形状・傾斜が、国空レーザー測量による元地形とほとんど差が無いことから、大規模崩壊部は斜面上

部に限られていることが判った。

(3) 差分解析による斜面形状の経時変化の解析

斜面形状の経時変化を解析するために、航空レーザー測量による崩壊前の崩壊前地形と、16 日後、69 日後、471 日後の写真画像から作成した崩壊後の 3 次元地形モデル間で差分解析を実施した（図-5）。点群データの差分解析には、CloudCompare 搭載の M3C2 プラグイン⁶⁾ による計算結果を使用した。M3C2 プラグインによる差分解析は、点群データから任意の密度で抽出した点集合から平面形状を近似計算し、計算された平面から個々の点群データへの距離を求めることで、モデル間の差分を計算・表現する手法である^{3, 6)}。計算結果は点座標と差分を持つデータ群であるために、定量的な取り扱いが可能となる。

差分解析結果を図-5 に示す。差分は変化前の地形モデル上に、流出部（マイナス）が青、堆積部（プラス）が

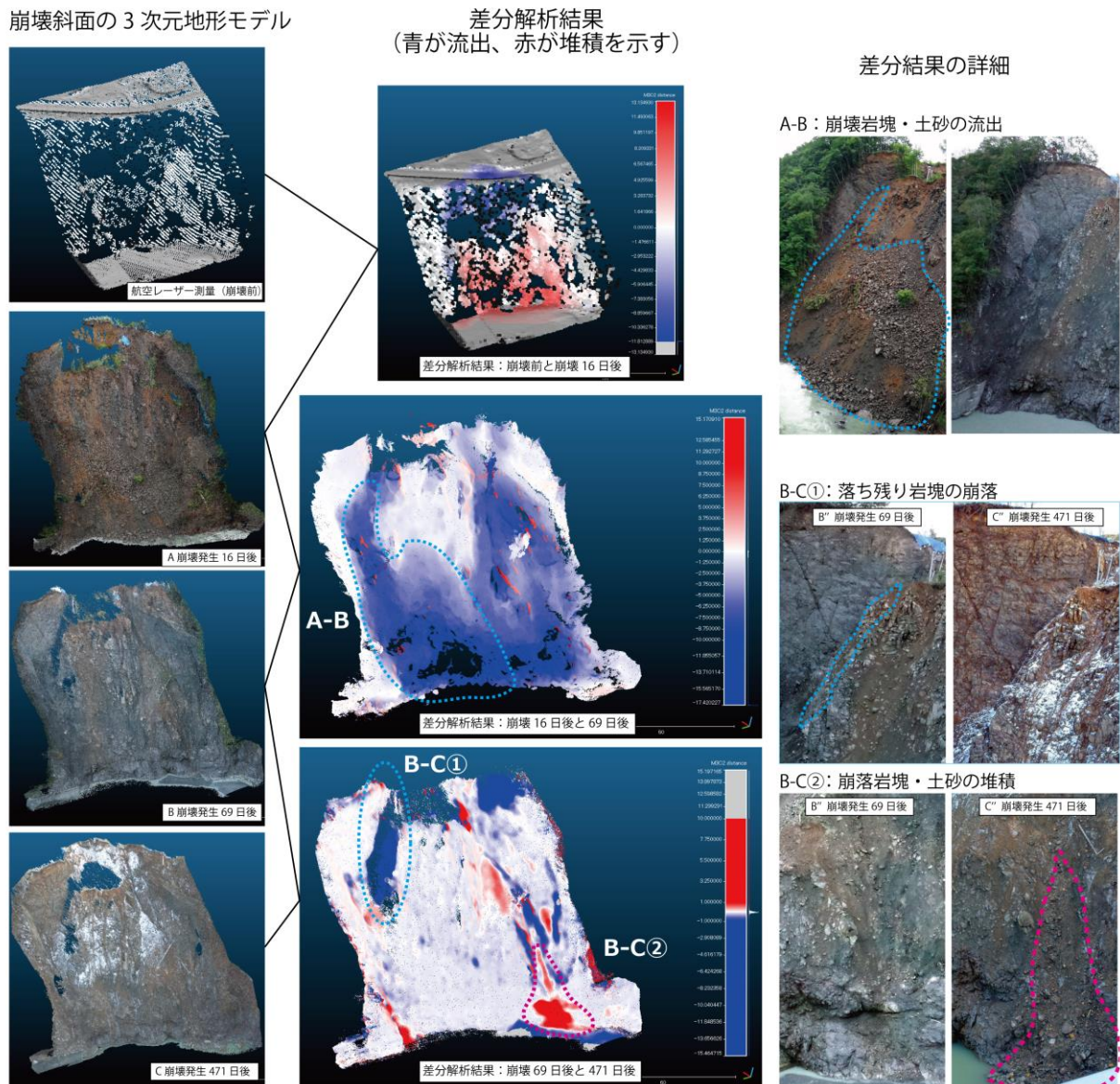


図-5 航空レーザー測量および 3 次元地形モデルの差分解析による斜面崩壊の経時変化の解析事例。

が赤として表現したものである。スケールバーはm単位である。航空レーザー測量による元地形と、崩壊 16 日後との差分解析結果からは、斜面崩壊の範囲と、斜面上部の崩壊による岩塊の崩落・滑動部と、崩壊岩塊・土砂の斜面下部への堆積部が読み取れた。ただし、航空レーザー測量によるデータ密度が低いため、微細な斜面形状の変化については判別できなかった。

一方で、3次元地形モデル同士による崩壊 16 日後と 69 日後（以下、差分 A-B）、69 日後と 471 日後（差分 B-C）の差分解析結果からは、より詳細な斜面形状の変化が読み取ることができた。差分が顕著な箇所例として、差分 A-B による解析結果からは、斜面上部中央の落ち残り岩塊に明瞭な変化がないこと、それを取り囲むように堆積していた崩壊堆積物の流出したことが確認できた。さらに、差分 B-C による解析結果においても、落ち残り岩塊の全体の滑働や崩壊は進行していないことが分かった。一方で、差分 B-C においては、岩塊側面部の崩落（図 5 中の B-C ①）や、数 10cm～数 m 規模の落石・崩落（スポット状の青色部）、ガリー状の侵食（B-C ②の上側）などが発生し、斜面下部に崩壊堆積物が再堆積している様子（B-C ②）が確認され、崩壊後も小規模な崩壊が継続していることが分かった。これは、斜面崩壊現場における簡易的な写真撮影の結果から、斜面崩壊の発生直後から、斜面形状が安定するまでの経時変化を定量的に解析可能であることを示している。

また、各差分解析結果をより詳細に見ると、斜面上の倒木の移動や落石の抜け跡など、写真を肉眼で見比べる際に判りにくい数 10cm 程度の変化も読み取ることが可能であった。また、露出岩盤に認められる亀裂や節理の走向傾斜の読み取りも可能であった。

このように、異なる時期における地形モデルの差分解析を実施することで、落石など微細な変状などによる変化量を定量的に見積もることが可能となり、日常的な点検により、斜面安定性を定量的に取り扱うことが可能となろう。また、元地形との差分による崩壊土砂量と、斜面上に残存する土砂量との差し引きから、流出した土砂量が推定できるため、河川への土砂供給量の定量的・経時的に把握することなどに応用できる。

5. まとめ

斜面崩壊が発生した河川斜面を対象に、崩壊後の異なる時期に撮影したデジタルカメラ画像と既存の航空レーザー測量結果のみを使用し、写真測量技術により3次元地形モデルを作成・重ね合わせを行った。作成された3次元地形モデルの断面解析・差分解析の結果から、斜面崩壊の規模、滑り面の推定、崩壊土砂の堆積・流出、落

ち残り岩塊の崩壊様式、落石の抜け跡などの小規模な変状などの斜面崩壊の諸現象を判読・解析することが可能であった。

このように、測量情報を与えずに写真測量による地形モデル作成する場合においても、画像ピクセル当たりの分解能、すなわちカメラと対象の距離と、カメラの焦点距離およびセンサー画素数から計算される1画素あたりの撮影解像度に対して、数～10倍程度の形状差分については、経時変化の観察および簡易的な地形変化の解析が可能であること、地形モデルに事後的に位置・測量情報等を付加することで、計測精度は粗いものの、大規模～微細な斜面形状の経時変化を定量的に解析することが可能であることが示された。今後は、対象斜面において小型無人航空機による撮影および現地測量を実施し経時変化の解析精度について検証を実施していきたい。

本手法は、安全性や調査時間に制限のある災害現場などでの1次情報の記録や、二次災害の防止に必要な地形情報を、カメラ一つで迅速かつ簡易的に、さらには事後的に計測することが可能となる手法であり、モデル作成に適した写真撮影法に留意した現場情報の記録方法として広く普及することが望まれる。

謝辞：差分解析に使用した航空測量データは北海道開発局よりご提供頂いた。深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 織田 和夫：Structure From Motion (SfM) 第一回 SfM の概要とバンドル調整、写真測量とリモートセンシング、Vol. 55, No. 3, pp. 206-209, 2016.
- 2) 内山庄一郎、井上公、鈴木比奈子：SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究、防災科学技術研究報告、第 81 号、pp. 37-60、2014.
- 3) James, M. R., Robson, S. and Smith, M. W.: 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys, Earth Surface Processes and Landforms 42, pp. 1769-1788, 2017.
- 4) 国土地理院：UAV を用いた高校測量マニュアル（案）、平成 29 年 3 月 31 日改正、国土交通省国土地理院、2017.
- 5) CloudCompare (version 2.8.1) [GPL software], Retrieved from <http://www.cloudcompare.org/>, 2017.
- 6) Lague, D., Brochu, N. and Leroux, J.: Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z), ISPRE Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 82, pp. 10-26, 2013.