

# UAV-SfMを用いた国道229号乙部町館浦 岩盤崩壊後の変状・亀裂の解析

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 ○川又 基人  
坂本 尚弘  
倉橋 稔幸

2021年6月6日に一般国道229号館の岬トンネル小樽側で、比高約70 mの垂直に近い崖の一部が崩壊する岩盤崩壊が発生した。岩盤崩壊した斜面を対象に、無人航空機(UAV)による撮影と手持ちカメラによる地上撮影を実施し、写真測量技術(SfM処理)を用いて3次元地形モデルを作成した。地上写真から作成した3次元地形モデルからは、岩盤崩壊後に発生した数十cm四方の小規模な落石を抽出できた。また、UAV-SfM処理によって作成した3次元地形モデルから開口亀裂のマッピングを行い、踏査が困難な急崖斜面における亀裂分布の詳細な判読を行なった。

キーワード：岩盤崩壊、UAV、SfM処理、3次元地形モデル

## 1. はじめに

2021年6月6日に北海道爾志郡乙部町館浦の海岸線に面する一般国道229号の館の岬トンネル小樽側(KP=278.619~278.684の山側斜面)で岩盤崩壊が発生した(図-1)。人的被害はなかったものの、崩壊した岩盤の衝突により落石防護擁壁と落石防護柵(総高7 m)が延長65 mにわたり被災した<sup>1)</sup>。当該斜面には現状でも開口亀裂が多く見受けられ、今後同等の岩盤崩壊の発生が危惧されており<sup>2)</sup>、当該斜面の変状をモニタリングすることは今後の安全性評価のためにも必要である。

近年、無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle: 以下UAVと略す)の普及に加えて多数のステレオペア画像から撮影対象の3次元地形モデルを作成するSfM多視点ステレオ写真測量(Structure from Motion with Multi-View Stereo Photogrammetry: 以下SfMと略す)の手法開発が進んだこ

とで、地形・地物の3次元計測がさまざまな分野で広まっている<sup>3)</sup>。SfM処理によりオーバーハングなどを含む複雑な地形形状のものも簡便かつ詳細に3次元計測することが可能となり、その地形研究への有効性<sup>4)</sup>や写真撮影方法の最適化<sup>5)</sup>などが検討されてきている。

これまで斜面の変状を探る手法として、3次元地形モデルの点群間の差分解析法<sup>6)</sup>や、画像間の色調差分変化を抽出する背景差分法<sup>7)</sup>などが検討されており、それぞれ斜面における変状の抽出に対しての有効性が示されている。このようにアクセス困難な岩盤斜面の変状把握に関して、人の目による点検・比較では見落としさるような微細な変化をより効率的・客観的に抽出することが可能となってきた。

そこで本研究では、岩盤崩壊発生後の災害斜面を対象に手持ちカメラとUAVによる撮影を行い、撮影した写真をSfM処理することで、3パターン<sup>8)</sup>の3次元地形モデル



図-1：災害斜面のパノラマ写真(2021年6月7日撮影 函館開発建設部提供)

(Ground-SfM-beforeモデル、Ground-SfM-afterモデルおよび、UAV-SfMモデル)を作成した。手持ちカメラを用いた地上撮影写真から作成した3次元地形モデルの点群間の差分解析および背景差分解析を行い、微細な変状(小規模落石)の抽出を試みた。また、UAV写真とSfM処理(以下UAV-SfMと略す)で作成した3次元地形モデルを用いて、急崖斜面の開口亀裂の走向傾斜を判読し、現地クライミング踏査で報告されている走向傾斜の値とを比較した。

## 2. 岩盤崩壊の素因と誘因

角ほか(1970)<sup>8)</sup>によると、崩壊した岩盤斜面の地質は新第三紀中新世館層の泥岩および凝灰質砂岩層(Ta)である。地層の主体は、明瞭な層理をもたない、粗粒な泥岩と泥質細粒砂岩から構成され、凝灰質砂岩と凝灰岩をかなり多くはさむ。泥岩は、ほとんどがシルト優勢であり、かなりが細粒砂を多く含む。細粒砂岩は、主に極細粒砂岩で、シルトを非常に多く混じており、泥岩と漸移的な関係にある。凝灰質砂岩は、泥岩・細粒砂岩中に薄層、ところどころで厚層となつてはさまれ、一部で泥岩・砂岩と互層を作っている。多くは、火山灰を主材料として生じた細粒砂岩・中粒砂岩であつて、淡色火山ガラス・軽石類から構成された灰白色などの層と、暗色火山ガラス・スコリア類から構成された暗灰色などの層とがある。凝灰岩は、安山岩質および珪長質で、細粒火山灰からできた厚層などとして存在し、通常、細かい平行層理をおびている。

技術検討会資料<sup>1)</sup>によると、被災区間近傍の館浦テレメータでは、6月4日7時から15時までに連続雨量34mm、6月4日12時～13時に最大時間雨量7mmを記録した。また前月の5月16日11時から5月17日6時までに連続雨量113mm、5月16日20時～21時、5月17日1時～2時に最大時間雨量12mmを記録した。4月1日以降、今回の6月6日の崩落発生時までの累計降雨量は324mmで、過去10年の平均降雨量158mmの約2倍となつていた。斜面は層状構造で緩い流れ盤を呈し、全般的に風化作用を受けて脆く褐色～黒色を呈している。急崖面下部にはオーバーハング地形が形成され、崩壊面の状況から、急崖面上部は開口亀裂が連続し、かつ亀裂間に堆積物が詰まっており、降雨等の後には表面水が浸透していたと推察されている<sup>2)</sup>。このほか、崩壊面や崩壊部と未崩壊部の境界からはスメクタイトが検出された<sup>2)</sup>。以上のことから、過去の地震、雨、凍結融解、乾湿繰返し等が誘因となり、亀裂に沿って岩盤の劣化が進行し、岩盤崩壊に至つたと推察されている<sup>2)</sup>。

## 3. 手法

### (1) 3次元地形モデルの作成

#### a) 斜面の写真撮影

本報告の解析手順と使用した機材・ソフトウェアを図-2に示す。2021年7月9日に災害斜面を対象として、地上からデジタル一眼レフカメラによる撮影、およびUAVによる空撮を行なった(写真-1)。UAV撮影中に、小規模な落石によると思われる音(落石音)が確認された。そのため後の3次元地形モデル作成のためのSfM処理には、小規模落石発生前に地上から撮影していた写真、および落石発生後に地上から撮影した写真をそれぞれ用いることとし、後の差分解析により小規模落石箇所の抽出を試みた。地上撮影は対象斜面に対しておよそ約80m程度の距離から行った。また、一定方向のみからの撮影ではオーバーハングを含めた複雑かつ微細な地形においては不可視となる部分が生じ、生成される3次元地形データに密度の不足や欠落をきたすことがある<sup>5)</sup>。そのため、不可視領域をなくすよう、対象斜面の斜め方向からの撮影を加えた(写真-2)。地上撮影にはフルサイズの撮像素子(イメージセンサー)を搭載し、高精細の写真撮影の可能なデジタル一眼レフカメラNikon D810を用い、単焦点かつ歪曲収差(ディストーション)の少ないSIGMA 35mm F1.4 DG HSM Artレンズをマウントし撮影を行なった(表-1)。以上より、対象斜面において解像度cmオーダーの写真が得られた。

UAV撮影はPhantom4-RTKを用いて行い、電子基準点「乙部」を使用した後処理キネマティック解析により、撮影した位置情報の高精度化を撮影後に行なった。隣接する写真のオーバーラップ率は、地上およびUAV撮影それぞれでSfM処理で必要となる60～80%以上<sup>9)</sup>とした。

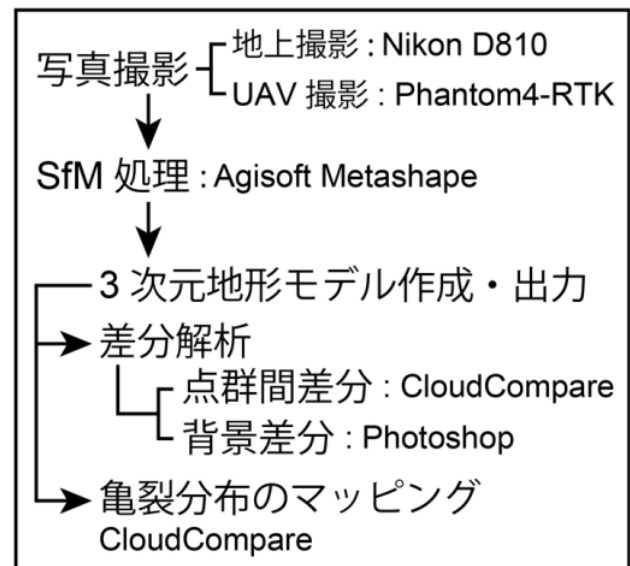


図-2: 解析フローと使用機材・ソフトウェア



写真-1 写真撮影方法

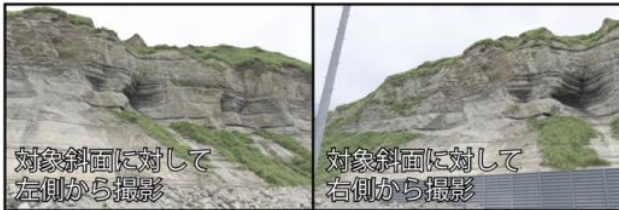


写真-2 地上からの写真撮影例

表-1 撮影条件と仕様

作成モデル名	Ground-SfM-beforeモデル	Ground-SfM-afterモデル	UAV-SfMモデル
写真撮影機材	Nikon D810	Nikon D810	Phantom4-RTK
画素サイズ	4.88×4.88 μm	4.88×4.88 μm	2.41×2.41 μm
画像サイズ	7360×4912	7360×4912	5472×3648
焦点距離	35 mm	35 mm	8.8 mm
画像形式	jpeg	jpeg	jpeg

## b) SfM処理

SfM処理にはAgisoft Metashape Professional 1.64を用いた(表-2)。まず、撮影位置を推定する処理(Align Photos)において、異なる写真間の同一点として使用する特徴点を抽出した。その際、その精度(Accuracy)をHighestとし、出来る限り正確かつ多くの特徴点を抽出することを目指した。その後、多視点画像計測による点群計測により、対象物の高密度3次元色付点群を得ることで3次元形状を構築する処理(Build Dense Cloud)を行った。その際、生成するポイント数(Quality)はUltra Highとした。

表-2 SfM処理条件

SfM処理条件	Ground-SfM-beforeモデル	Ground-SfM-afterモデル	UAV-SfMモデル
写真枚数 (Aligned cameras)	187枚	65枚	554枚
マッチング設定 (Accuracy)	Highest	Highest	Highest
高密度点群出力設定 (Quality)	Ultra High	Ultra High	Ultra High
フィルタリング強度 (Depth filtering)	Mild	Mild	Mild
タイポイント数	560,362	190,301	115,755
高密度点群数	403,187,461	104,124,165	485,444,003

## c) 3次元地形モデル出力

本報告では小規模な落石が発生した前と後の地上写真および、UAV空撮写真に対しそれぞれSfM処理を行うこ

とで、3パターンの3次元地形モデルを作成した。それぞれ、Ground-SfM-beforeモデル、Ground-SfM-afterモデルおよび、UAV-SfMモデルと呼称する。

## (2) 差分解析

### a) 点群間の差分

差分解析にはGround-SfM-beforeモデルとGround-SfM-afterモデルを用いた。点群モデル間の差分解析はオープンソースソフトウェアであるCloudCompareを用いた。既存研究手法<sup>6)</sup>に則り、まずICP法を用いた2点間群の精密な重ね合わせを行った上で、M3C2アルゴリズムによる点群間の差分解析を行なった。

### b) 背景差分法

背景差分法は同じ構図の2枚の写真の差分を取ることで、色調の変化がないPixelが(R:G:B=0:0:0)黒く表示される一方、変化のあった箇所が白く浮き上がるように認識できることを利用した差分解析手法である<sup>10)</sup>。そのため斜面変状の抽出のためには撮影位置と撮影方向を揃えた上で、複数時期の写真について同じ設定で撮影する必要がある。また、撮影範囲とその分解能は、撮影距離やレンズの焦点距離、センサーサイズや画素数に依存するため、同機種のUAVやカメラを用いることが理想である。実際見た目もほぼ変わらない2画像においても、正確に重ね合わせられていない事例が報告されている<sup>7)</sup>。すなわち、撮影範囲や構図のずれだけでなく、レンズの焦点距離の違いからくる地形の起伏と射角の関係による写像の歪みが背景差分の成否に大きく影響している<sup>7)</sup>。

本報告では3次元地形モデルを構築し、点群間の差分をとった構図のキャプチャー画像を利用して背景差分を行なった。これにより、撮影位置の僅かな違いなどによる写像の歪みといった、撮影位置の不確実性をキャンセルすることができる。

## (3) 亀裂分布のマッピング

今回用いた一眼レフカメラには撮影位置情報が組み込まれていないため、一眼レフカメラで撮影した写真により作成された3次元地形モデル(Ground-SfM-beforeモデルおよび、Ground-SfM-afterモデル)には3次元位置情報(XYZ)が存在せず、相対形状のみが反映されている。そのため、亀裂分布のマッピング・判読については、位置座標が撮影写真に付与されているUAV-SfMモデルを用いた。技術検討委員会<sup>9)</sup>で指摘されている「急崖面に連続する亀裂」について、UAV-SfMモデルを用いてCloudCompare上で亀裂をトレースした。トレースした亀裂の走向傾斜の判読を行ない、クライミング踏査結果<sup>2)</sup>による成果と比較した。



## 4. 結果・考察

### (1) 3次元地形モデルの構築と記載

図-3に作成したモデルの一例を示す（Ground-SfM-afterモデル）。オーバーハングにおいても、明らかな点群の欠損等は見受けられず、問題なく高密度点群を作成できた。作成・出力した3次元地形モデルは、視点方向を任意に変更しながら、地形情報を読み取ることができる。

3次元地形モデルからは、砂岩泥岩互層の差別侵食や層厚の違いといった層構造、急崖面に連続する亀裂、岩盤表面の節理といった詳細な微地形が読み取れる。特にオーバーハング箇所には鉛直の亀裂が確認でき（図-3）、岩盤崩壊直後には亀裂に沿った水の染み出しが報告<sup>1)</sup>されている。この鉛直亀裂に沿った水の染み出しが選択的な岩石強度の低下と剥落の卓越、すなわちオーバーハングの形成につながっている可能性がある。オーバーハングは岩盤の不安定化に影響を与えると考えられ、技術検討会資料<sup>1)</sup>中で言及されている開口亀裂の分布や湧水管所の特定は、今後の岩盤斜面の評価において重要である。

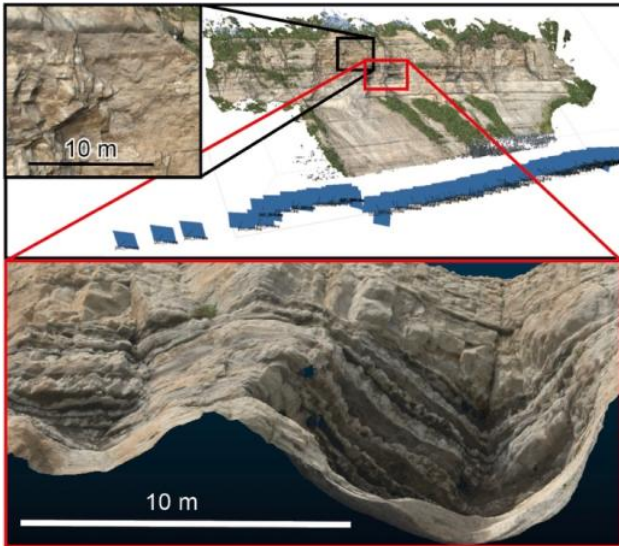


図-3 3次元地形モデル（Ground-SfM-after）、青四角は写真撮影位置、下図はオーバーハングの下方方向からの拡大表示

### (2) 差分解析結果

図-4にGround-SfM-beforeモデル、Ground-SfM-afterモデル、それらの点群間差分、および背景差分結果を示す。Ground-SfM-beforeモデル、Ground-SfM-afterモデルそれぞれ一見ではその変化を判読するのは困難であった。しかし、点群間の差分解析により、およそ60×30 cm程度の範囲で明らかな点群間距離の差を検出した（図-4c）。この地点は背景差分法を用いた差分解析においても、明瞭とは言えないものの白く浮き上がって見えた（図-4d）。以上の結果から、この地点でおよそ60×30 cm程度の小規模な落石が発生したことが示唆される。

また背景差分手法に関しては、これまで画角の調整や

オルソ化などが考案されてきた<sup>7)</sup>が、本報告ではCloudCompare上での位置合わせ後のキャプチャー画像からでも落石後の変化を抽出できる可能性を示した。今回の背景差分結果に関しては、画像間の色調補正をより厳密に行うことで、より明瞭に判読できるようになる可能性がある。

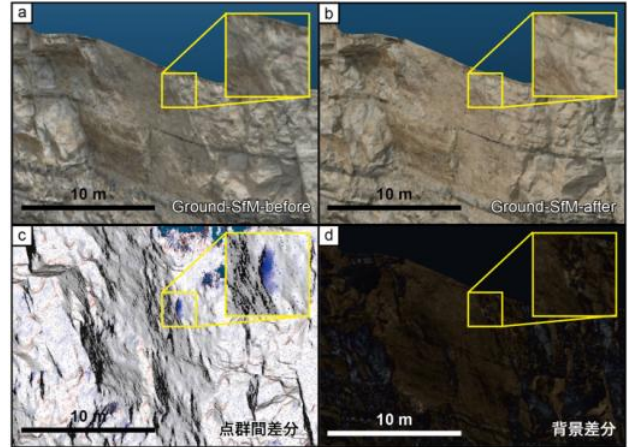


図-4 (a) Ground-SfM-beforeモデル、(b) Ground-SfM-afterモデル、(c) Ground-SfM-beforeモデルとGround-SfM-afterモデルの点群間差分、(d) 背景差分の結果

斜面までの適度な距離が確保でき、地上からの連続撮影が可能ならば垂直斜面の場合、地上からの一眼レフカメラを用いた撮影で高密度な3次元地形モデルを作成することができ、2つの地形モデルの差分解析により数十cmスケールの落石を抽出することができた。ただし、撮影の際には、今回用いたような高精細な写真の撮影可能なデジタル一眼レフカメラや、焦点距離の変化しない単焦点でかつ歪みの少ないレンズの使用が望まれる。また、多時期の反復計測データを比較する場合、各時期のデータの正確な位置合わせが重要であり、誤差を把握した上で、地形変化の検出限界を見極める必要がある<sup>11)</sup>。

### (3) 亀裂のマッピングとその走向傾斜の判読

図-5にUAV-SfMで作成した3次元地形モデルで判読した開口亀裂のマッピング結果を示す。また図-6に技術検討会資料<sup>2)</sup>と今回のUAV-SfMモデル上での亀裂の走向傾斜の判読結果を示す。亀裂の判読結果を比較すると、走向に関して地形モデルからの判読結果と現地クライミング踏査による報告<sup>2)</sup>の差は、最大17度であった（図-6）。また傾斜に関しては技術検討会資料では全て90度と報告されている一方、UAV-SfMモデル上での読み取りでは66～89度の値を取った。このように現地踏査結果とUAV-SfM上で多少の差は確認されたものの、その傾向に大きな誤りはない。地形モデルを用いた計測については、作成される地形モデルの精度に依存すると考えられ、対象とする現象のスケールや目的に応じた適切な解像度や、精度内での検討が必要であろう。UAV-SfMモデルは、急崖斜面といったアクセス困難地においても、距離・亀

裂分布の定量的な計測が可能であり、斜面の安定性の評価や落石シミュレーション等に有効に活用できると考えられる。

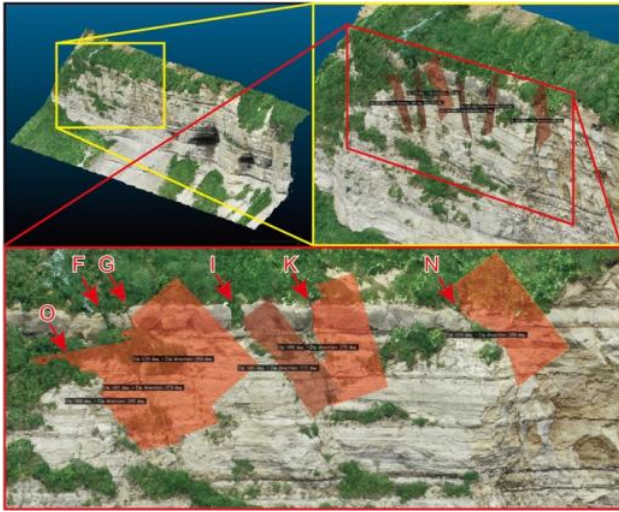


図-5 技術検討会資料で報告された「急崖面に鉛直方向に連続する亀裂」について、UAV-SfMモデルを用いたマッピング結果

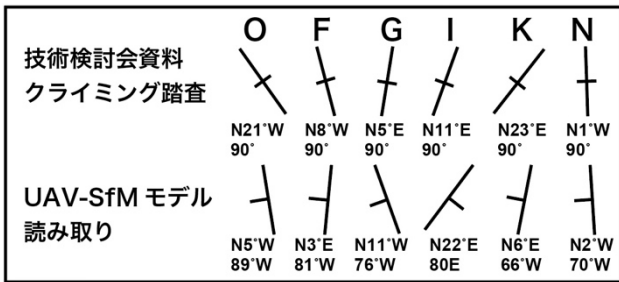


図-6 技術検討会資料および、今回のUAV-SfMモデル上での亀裂の走向傾斜の判読結果

## 5. まとめ

本研究では、岩盤崩壊が発生した後の斜面において、地上撮影とUAV撮影を実施し、SfM処理により3パターンの3次元地形モデルを作成した。地上写真については小規模な落石が発生したと思われる前後の写真それぞれでモデル（Ground-SfM-beforeモデル、Ground-SfM-afterモデル）を作成した。本報告からは以下のことが明らかとなった。

- 作成した3次元地形モデルは、オーバーハングにおいても点群の欠損等は見受けられず、砂岩泥岩互層の差別侵食や層厚の違いといった層構造、急崖面に連続する亀裂、岩盤表面の節理といった詳細な微地形が復元できていた。

- Ground-SfM-beforeモデル、Ground-SfM-afterモデルを利用した点群モデル間の差分取得法、および背景差分法による検討により、数十cmスケールの落石抽出ができた。今後は、多時期の地形モデルを用いた解析におけるモデルの歪みの評価や、位置合わせ誤差など検討した上で、検出限界を探る必要性がある。
- UAV-SfMにより作成した3次元地形モデルから読み取った亀裂の走向は、クライミング踏査から判定された走向に対し最大17度の範囲内の差に収まった。アクセス困難な急崖斜面における亀裂分布の評価などに、UAV-SfMの有効な活用が期待される。

謝辞：国土交通省北海道開発局函館開発建設部と江差道路事務所から資料の提供、および現地調査における様々なご協力を頂いた。深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 国土交通省北海道開発局函館開発建設部：国道 229 号乙部町館浦地区斜面对策技術検討会（第 1 回）2021. URL : <https://www.hkd.mlit.go.jp/hk/douro/v151sd0000000sar.html>
- 国土交通省北海道開発局函館開発建設部：国道 229 号乙部町館浦地区斜面对策技術検討会（第 2 回）2021. URL : <https://www.hkd.mlit.go.jp/hk/douro/v151sd0000000sar.html>
- 内山庄一郎, 井上公, 鈴木比奈子：SfM を用いた 3 次元地形モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究, 防災科学技術研究所研究報告, 第 81 号, pp. 37-60, 2014.
- 小花和宏之, 早川裕式, GOMEZ Christopher : UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング, 地形, 第 35 巻, pp. 283-294, 2014.
- 奥水健一, 川上源太郎, 石丸 聡, 小安浩理, 加瀬善洋, 廣瀬 亘, 高橋 良, 卜部厚志：急崖斜面を対象とした UAV-SfM 測量におけるカメラ撮影方向の検討, 北海道地質研究所報告, 第 91 号, pp. 49-53, 2020.
- 山崎秀策, 日外勝仁, 倉橋稔幸：UAV-SfM による岩盤斜面形状の計測・モニタリング制度の検証, 寒地土木研究所月報, 第 793 号, pp. 21-27, 2019.
- 日外勝仁, 倉橋稔幸：UAV による岩盤斜面写真に対する背景差分法の適用可能性について, 寒地土木研究所月報, 第 780 号, pp. 13-18, 2018.
- 角 靖夫, 垣見俊弘, 水野篤行：5 万分の 1 地質図幅説明書 江差, 札幌 第 78 号, pp. 1-53, 1970.
- 早川裕式, 小花和宏之：小型無人航空機を用いた SfM 多視点ステレオ写真測量による地形情報の空中計測, 物理探査, 第 69 巻, pp. 297-309, 2016.
- 寒地土木研究所寒地基礎技術研究グループ防災地質チーム：写真計測技術を活用した斜面点検マニュアル（案）. URL : <https://chishitsu.ceri.go.jp/soff.html>
- 早川裕式, 小花和宏之, 齋藤仁, 内山庄一郎：SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的応用, 地形, 第 37 巻, pp. 321-342, 2016.