

空中写真測量を用いた崩壊斜面の経時的变化に関する研究
-飛騨の風化変成岩を対象に-

A study of temporal changes in collapsed slopes using aerial photogrammetry
-the case of weathered metamorphic rocks in the Hida area-

山内 滉大¹, 藤井 幸泰², 日野 康久³, 加藤 歌那子⁴

1 名城大学大学院・理工学研究科・社会基盤デザイン工学専攻・213433009@ccmailg.meijo-u.ac.jp

2 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科

3 KANSO テクノス

4 元名城大学

概 要

岐阜県飛騨市近辺は特別豪雪地帯に指定され、融雪による斜面災害が危惧されている。これを回避するには、斜面崩壊の初期現象を捉えることが効果的である。また、近年では無人航空機を用いた空中写真測量の利活用が急速に進められており、斜面崩壊への適用も図られている。そこで本研究では、空中写真測量を用いて斜面崩壊の初期現象を捉えることを目的とする。さらにその目的に必要な測量条件の把握も試みる。具体的には2021年4月に撮影した空中写真から斜面を3Dモデル化し、崩壊斜面表層の状態を観測する。さらに1年後の斜面の3Dモデルと比較し、経時的变化を明らかにすることで、斜面崩壊の初期あるいは前兆現象の把握を試みる。これに加えて、撮影高度や標定点の数を変化させ、測量時の精度や解像度、コストを考慮した最適な撮影条件の調査も試みる。結果の一例として、撮影高度が100m以上の場合、15cm以下の落石などは3Dモデル上で判別できないことが確認された。

キーワード：岩盤斜面、特別豪雪地帯、無人航空機、斜面表層、Structure from Motion

1. はじめに

我が国は山地が多いため急な斜面も多く、降雨や融雪、地震等による斜面崩壊が起きやすい。斜面災害による被害を抑えるには、崩壊の恐れがある斜面を事前に把握することが重要である。そのためには、斜面崩壊の初期現象を捉えることが効果的である。その方法として、素早く安全な測量ができる空中写真測量を用いる。空中写真測量は、アナログ写真の頃から地すべり地等への活用が進められており¹⁻³⁾、近年では無人航空機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)による空中写真測量の斜面崩壊への適用も積極的に図られている(例えば尾原ほか⁴⁾など)。そこで本研究では、空中写真測量を用いて斜面表面の状態を経時的に観察し、斜面崩壊の初期現象を捉えることを目的とする。また、最適な測量条件の把握のため、撮影高度や標定点数、UAVの種類を変化させ、空中写真測量の精度や解像度の検証も行う。

測量条件の検証方法として、斜面崩壊の初期現象の一つである“落石”に見立てた実験を試みた。まず、大きさの異なる礫を2個ずつ、合計6個選定し、それらを任意に動かして移動前後の座標をトータルステーション(TS)と空

中写真測量で測定して比較を行った。

今回研究対象とする斜面は、岐阜県飛騨市河合町元田付近に位置している。(図1, 2)この近辺は特別豪雪地帯に指定され、融雪による斜面災害が危惧されている。さらに活断層である跡津川断層が小鳥川(おどりがわ)沿いに連続しており、地震による斜面崩壊のリスクも存在する。加えて、対象地の地質は変成岩である“飛騨片麻岩”を含む飛騨帯で構成されており、片理面に沿った亀裂が生じやすいため、斜面崩壊の要因になり得るとされている。



図1 研究対象地



図 2 対象斜面と小鳥川

2. 空中写真測量と使用機器

空中写真測量とは、航空機から撮影した空中写真を用いて、地形や地物の座標や標高を求める作業である。今回の測量では 2 種類の UAV を用いて実験を行う。撮影に使用した UAV と撮影条件を表 1 に示す。DJI Phantom4 PRO V2.0 は斜面でのプログラム飛行が困難であるため、手動撮影したため撮影枚数が高度や日にちによって異なる。

UAV は衛星測位システム (GNSS) を利用して自機の位置情報を把握している。しかし通常の GNSS 受信システムでは数 m～数十 m の位置誤差を含んでいる。RTK とは、Real Time Kinematic の略称であり、地上に設置する「固定局」からの位置情報データと移動する UAV などの「移動局」のやり取りによって、高い精度の測位を即時に可能にする衛星測位の技術であり、DJI Phantom4 RTK はこの機能を搭載している。

表 1 撮影に使用した UAV と撮影条件

機体名	撮影高度 (m)	撮影枚数		焦点距離 (mm)	地上解像度 (mm)	標定点数
		9 日曇り	10 日晴れ			
DJI Phantom4 PRO V2.0	30	253	221	8.61		
DJI Phantom4 RTK	50	76	76	8.8	13.71	0
						1
						2
						3

3. 研究方法

ここでは現地での作業と、現地で取得した空中写真量と測量値を利用した室内解析とに分けて説明する。

3.1 現地作業

研究対象地は岐阜県飛騨市河合町元田付近の斜面である。2021 年 4 月 9 日と 10 日の 2 日間で撮影を実施した。

現地では下記の手順で標定点測量と UAV による空中写真撮影などを実施した。

- 1) 斜面全体の適切な位置に対空標識 (標定点) を設置
- 2) トータルステーション (TS) で標定点の座標を測定
- 3) 大中小の礫を 2 個ずつ、計 6 個を現地で選定
- 4) TS で礫の中心部の座標を測定
- 5) 撮影高度を変えて UAV で空中写真を撮影
- 6) 翌日に礫を動かした後、再度 5) と 6) を実施

標定点の位置を図 3 に示す。標定点とは、空中写真測量の測量精度を向上させるために設置する、座標値が明らかな点である。次に、選定した礫の位置を図 4 に、礫の大きさを表 2 に示す。

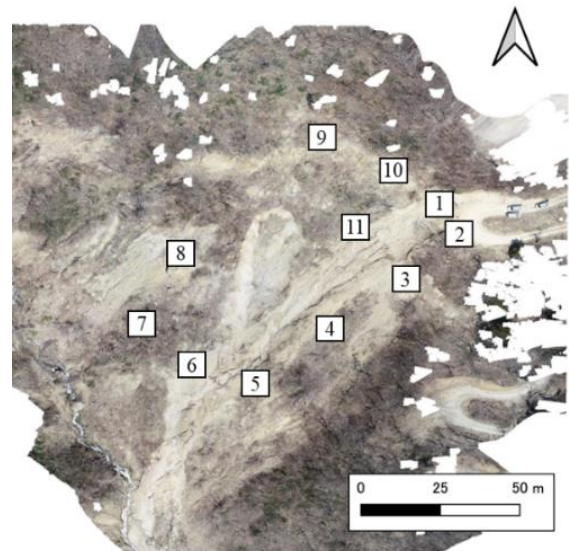


図 3 標定点の位置

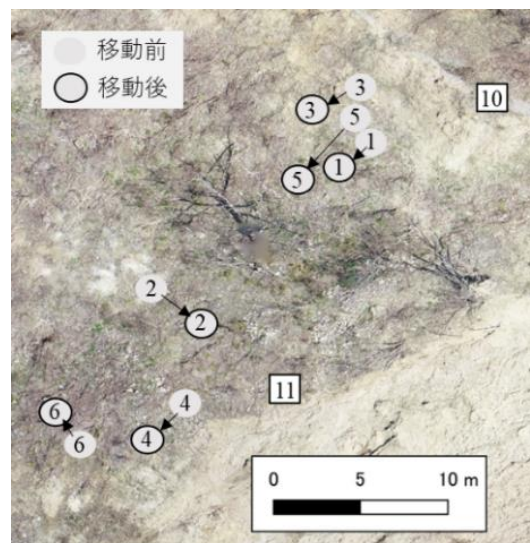


図 4 礫の位置

表 2 礫の大きさ

礫	礫の大きさ	礫の長径 (cm)	礫の短径 (cm)
I-1	小	10	7~8
I-2			
I-3	中	15~20	13~15
I-4			
I-5	大	20~30	20
I-6			

3.2 室内解析

3.2.1 室内での三次元モデル化

室内では SfM / MVS (Structure from Motion / Multi-view Stereo) ソフトを用いて、下記手順で斜面の三次元モデル化を実施した。

- 1) Agisoft Metashape へ空中写真を読み込む
- 2) アライメントを実施
- 3) 高密度クラウド構築
- 4) メッシュ構築をして、3次元モデルを作成
- 5) テクスチャー作業を実施

画像の重複部分から同一の特徴点をマッチングし、点の集合体を作成すると共に、撮影時の UAV の位置と撮影方向を復元する作業をアライメントという。同時にポイントクラウドの作成もできる。また、ポイントクラウドの高密度化処理を行い、より緻密な点の集合体を作成することを高密度クラウド構築という。

3.2.2 検証方法

3.12 で作成した三次元モデル上で、選定した礫が目視で判読可能かを調べた。判読可能なものに対し、三次元モデル上で礫の座標値を計測した。さらに、礫の移動前後の座標値をもとに、礫の移動距離も算出した。礫の座標値と移動距離は、それぞれ TS 測量で測定した値との差を取り、礫の座標値の誤差を E_c 、礫の移動距離の誤差を E_d とした。それぞれの計算式を(1)と(2)、(3)に示す。今回の検証では、三次元モデルから計測した座標値をモデル値、TS 測量で測定した座標値を真値と仮定して解析を行う。

$$E_c = \sqrt{(X_m - X_t)^2 + (Y_m - Y_t)^2 + (Z_m - Z_t)^2} \quad (1)$$

$(X_m \ Y_m \ Z_m)$: モデル値
 $(X_t \ Y_t \ Z_t)$: 真値

$$\sigma_1 = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2} \quad (2)$$

$$E_d = \sigma_m - \sigma_t \quad (3)$$

σ_1 : 礫の移動距離の絶対値
 $(X_1 \ Y_1 \ Z_1)$: 礫の移動前の座標値
 $(X_2 \ Y_2 \ Z_2)$: 礫の移動後の座標値

3.2.3 斜面表面の観測

3.1.2 で作成した斜面の三次元モデルから数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) を構築し、2022 年 4 月 10 日と 2022 年 4 月 13 日の撮影高度 60m の DEM の差分を取り、斜面表層の変化を捉えた。結果は後述する。

4. 研究結果

4.1 礫の判読結果

DJI Phantom4 PRO V2.0 の撮影高度 30m, 60m, 100m を三次元モデル上から目視で判読した結果を表 3 に示す。日射条件として 9 日が曇り、10 日が晴れの状態で撮影を行った。結果として、撮影高度 30m, 60m の条件では全ての礫が判読可能となった。そして、撮影高度 100m の条件では、礫の大きさが 15cm 以下の場合が判読困難であった。この結果より、撮影高度 100m の条件では礫の判読が困難であると判断し、今後の検証では考慮しないこととする。

表 3 礫の判読結果

撮影高度 (m)	撮影日	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6
		(7cm)	(10cm)	(13cm)	(15cm)	(20cm)	(30cm)
30	9 日	○	○	○	○	○	○
	10 日	○	○	○	○	○	○
60	9 日	○	○	○	○	○	○
	10 日	×	○	○	○	○	○
100	9 日	×	×	×	○	○	○
	10 日	×	×	×	×	○	○

4.2 撮影高度の違いによる比較

DJI Phantom4 PRO V2.0 の撮影高度 30m, 60m の条件で礫の座標値の誤差 (E_c) を算出した結果を表 4 に示す。撮影高度 30m の最大値は 106mm, 最小値は 19mm, 撮影高度 60m の最大値は 107mm, 最小値は 33mm となった。また、平均を取るとどちらの撮影高度も 70mm 程度の誤差であった。このことから、座標の誤差は撮影高度による影響が低いと考えられる。

表 4 撮影高度の違いによる礫の座標値の誤差 (E_c)

撮影高度 (m)	撮影日	礫の座標の誤差 E_c (mm)						平均 (mm)
		I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	
30	9 日	71	67	19	64	71	80	72
	10 日	70	92	72	106	70	78	
60	9 日	95	7	45	77	83	71	68
	10 日	47	65	33	107	68	55	

次に、礫の移動距離の誤差 (E_d) を算出した結果を表 5 に示す。撮影高度 30m の最大値は 54.02mm, 最小値は 7.92mm, 撮影高度 60m の最大値は 52.43mm, 最小値は 0.97mm となった。最小値に違いが見られるが、平均ではどちらも 25mm 程度であった。このことから、今回の場合では撮影高度の違いはあまり影響しないと考えられる。

表 5 撮影高度の違いによる礫の移動距離の誤差 (E_d)

撮影高度 (m)	礫の移動距離の誤差 E_d (mm)						平均 (mm)
	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	
30	7.92	54.02	6.44	39.43	14.43	37.33	26.6
60	31.18	13.54	0.97	52.43	29.85	20.06	24.7

4.3 UAV と標定点数の違いによる比較

DJI Phantom4 RTK において、標定点数の利用を 0~3 個の 4 つの条件に変更した場合、DJI Phantom4 PRO V2.0 の撮影高度に近い 60m の条件 (標定点 11 個) で礫の座標値の誤差 (E_c) の平均を算出した結果を表 6 に示す。撮影高度 50m, 標定点数 0 個の平均値が 385mm となり、他の条件と比較しても非常に大きいことから、Phantom4 RTK の撮影時の位置情報のみで三次元モデル上から礫の座標を正確に読み取ることが困難であると考えられる。そこで、標定点の数を増やしたところ、標定点数が 3 個の条件で Phantom4 PRO V2.0 と同等の誤差が得られた。よって、許容誤差 70mm 程度を得るには標定点が最低 3 か所必要であるとわかった。

表 6 UAV と標定点数の違いによる礫の座標値の誤差 (E_c)

機体名	撮影高度 (m)	標定点数	最大 (mm)	最小 (mm)	平均 (mm)	地上解像度 (mm)
DJI Phantom4 PRO V2.0	60	11	107	33	68	17.23
		0	440	308	385	
DJI Phantom4 RTK	50	1	169	107	134	13.71
		2	192	39	99	
		3	92	41	64	

次に、礫の移動距離の誤差 (E_d) の平均を算出した結果が表 7 である。撮影高度 50m, 標定点数 0 個の条件が他に比べ 10mm 程度大きいですが、これは礫の座標値の誤差 (E_c) が影響していると考えられる。また、座標の誤差に対して移動距離の誤差はかなり小さい。考えられる理由として、三次元モデル全体の座標が等しく同じ向きにズレており、礫の移動距離の誤差が小さくなったと考えられる。

表 7 UAV と標定点数の違いによる礫の移動距離の誤差 (E_d)

機体名	撮影高度 (m)	標定点数	平均 (mm)	地上解像度 (mm)
DJI Phantom4 PRO V2.0	60	11	25	17.23
		0	38	
DJI Phantom4 RTK	50	1	23	13.71
		2	26	
		3	26	

4.4 二時期の斜面表層の比較

2022 年 4 月 10 日 (F10) と 2022 年 4 月 13 日 (F413) を撮影高度 60m で DEM の差分を計算した結果を図 5 に示す。赤色が堆積、青色が侵食、黄色が変化なしを示している。斜面の外回りは、図 6 のように測定範囲外もしくは植生の影響による異常値であるため、計測が困難もしくは不可能である。斜面の内回りを見ると、赤枠で示した部分で、斜面が 3m 程度鉛直方向に侵食され、斜面下側に堆積していることがわかる。

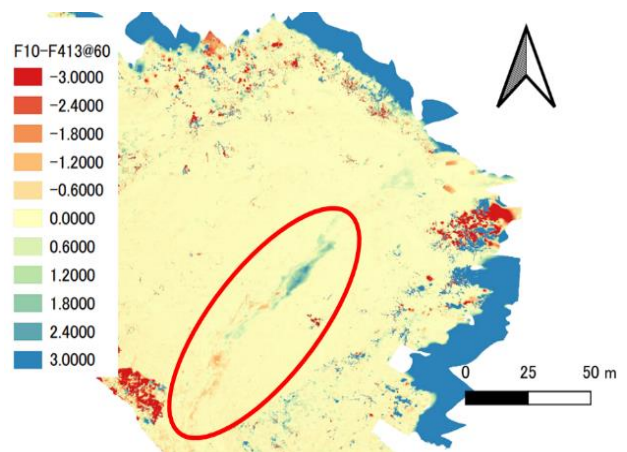


図 5 撮影高度60m での2021年と2022年の斜面のDEMの差分

図 6 は 2022 年 4 月 13 日の斜面のオルソモザイク画像である。図 5 と同様の場所を観察すると、斜面上側から地下水が漏れ出ているように見える。また、この地域は特別豪雪地帯に指定され、融雪による斜面侵食の可能性も高い。これらのことから、斜面を変化させた要因は、地下水の漏水と融雪による侵食が影響していると考えられる。

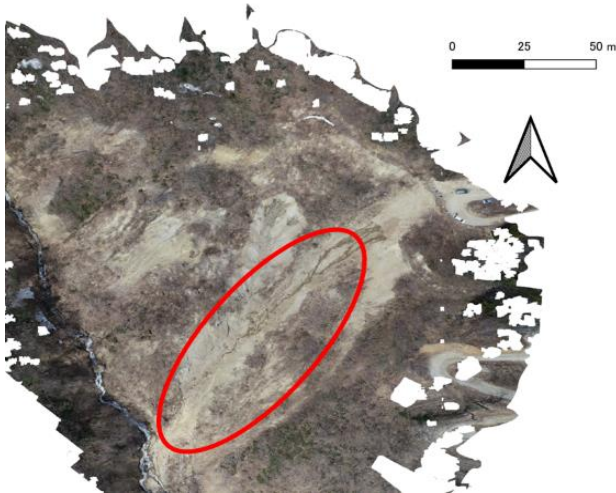


図 6 2022年4月13日の斜面のオルソモザイク画像

5. 考察

5.1 判読結果の考察

撮影高度 100m の条件下で 15cm 以下の礫が判読不能だった理由について考察を行う。今回検証に使用したカメラの焦点距離が 8.8mm，センサーサイズ 0.002527mm であるため，撮影高度が 100m の場合，地上解像度は 28.71mm/画素である。(図 7) 写真から対象物の判別を行う際，一般的に対象物の大きさが 5 画素分は必要とされる。今回の地上解像度 28.71mm では 5 画素に合わせると 14.4cm となる。以上の理由から，大きさ 15cm 以下の礫の判読ができなかったのだと考えられる。

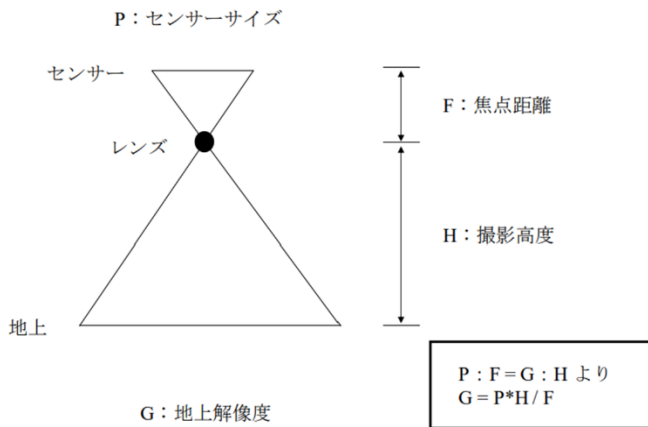


図 7 地上解像度の算出方法

5.2 最適な撮影条件の考察

使用した UAV や標定点数，撮影高度の違いによる比較の結果から，最適な撮影条件を考察する。撮影高度の違いによる比較結果から，撮影高度は誤差にあまりに影響しないことがわかった。撮影枚数が減ると撮影コストが抑えられることを考慮すると，今回の検証では撮影高度 60m の場合が最適だと考えられる。UAV と標定点数の違いによる比較をした結果，DJI Phantom4 RTK の撮影高度 50m の標定点数が 1~3 個の条件では，礫の移動距離の誤差は全て

許容誤差を得られた。そして，礫の座標の誤差は順に，134mm，99mm，64mm であり，標定点が 3 個の時点で許容誤差を得られた。したがって，今回の条件では，移動距離を調べただけなら標定点は 1 個，正確な座標まで調べたい場合は，標定点は 3 個設置すれば良いと考えられる。また，DJI Phantom4 PRO V2.0 の撮影高度 60m，標定点数 11 個の条件でも同様の精度を得られたが，標定点を斜面に設置する手間を考慮すると，標定点数が少なく済む DJI Phantom4 RTK の撮影高度 50m，標定点数 3 個の条件の方が最適だと考えられる。

5.3 標定点数の違いによる比較の考察

DJI Phantom4 RTK の撮影高度 50m，標定点数が 3 個の条件のときに，許容誤差を得られた理由を考察する。これは標定点の設置場所が影響していると考えられる。標定点数が 2 個の条件までは，斜面の上部の標定点を使用していたのに対し，3 個目は斜面の下部の標定点を使用した。これにより，標定点が斜面全体を囲うように置かれ，三次元モデル全体の座標値が調整され，許容誤差を得ることができたと考えられる。

6. 結論

本研究では，空中写真測量を用いて斜面表面の状態を経時的に観察し，斜面崩壊の初期現象を捉えることを目的とした。また，最適な測量条件の把握のため，空中写真測量の精度の検証も行った。まず，撮影高度 30m，60m の条件では今回対象とした全ての礫が判読可能となった。そして，撮影高度 100m の条件では，礫の大きさが 15cm 以下の場合が判読困難であった。これは，地上解像度が足りないためだと考えられる。次に，撮影高度の違いによる精度の比較をした結果，礫の座標の誤差と移動距離の誤差のどちらもほとんど違いが見られなかった。撮影高度が高いほど撮影枚数が減るので，今回のケースでは 60m の撮影条件が最適だと考えられる。そして，UAV と標定点数の違いによる比較をした結果，DJI Phantom4 RTK の撮影高度 50m，標定点数 0 個の条件で礫の座標の誤差が約 40cm となり，RTK の位置情報のみで正確な値を得るのは困難だといえる。そこで，標定点数を 3 個に増やした結果，許容精度を得ることができた。傾斜が急な斜面では，標定点を設置するのは困難であるため，標定点数が少なく済む DJI Phantom4 RTK，撮影高度 50m，標定点数 3 個の条件が最適だと考えられる。

最後に，斜面表面の経時的変化を観察した結果，斜面上部から地下水が漏出しており，融雪と共に斜面を侵食していると考えられる。2021 年 11 月に斜面を撮影しているため，2021 年 4 月から 11 月までの大雨や台風の斜面への影響を調べ，融雪や地下水の漏水が斜面崩壊の発生の要因，初期現象になりうるのか，今後さらに検討していきたい。

謝辞

現地調査ならびに測量調査にご協力いただいた株式会社 KANSO テクノス、ならびに株式会社コアシステムの皆様には大変お世話になりました。紙面を借りてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 宮澤圭, 吉澤孝和, 小野塚良三, 久松文男: 時間差空中写真測量による地すべり解析システム-八幡平澄川地すべり地の変位計測データを利用した地すべり面の推定-, 写真測量とリモートセンシング, VOL.39, NO.1, pp39-47, 2000.
- 2) 宮澤圭, 吉澤孝和: 地すべり地の空中写真測量データの重みを考慮した三次元地下すべり面形状の推定, 写真測量とリモートセンシング, VOL.37, NO.6, pp14-27, 1998.
- 3) 吉澤孝和, 丸山昌義, 長尾勲, 村瀬孝三, 西澤茂高, 三澤敏雄, 根岸六郎: 空中写真測量による地すべり情報の提供とすべり面の解析-長野市広瀬地区に発生した地すべり地への応用-, 地すべり, Vol.27, No.4, pp9-17, 1991.
- 4) 尾原祐三, 吉永徹, 濱地亮: ドローンを用いた岩盤斜面観測システムの測恵精度とその適用, Journal of MMIJ, Vol.134, No.12, pp.222-231, 2018.