

無人航空機の写真撮影による砂防堰堤の堆砂量の把握について

嶋田 圭悟¹・木村 洋郎²

¹和歌山県土砂災害啓発センター (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

²和歌山県土砂災害啓発センター (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

令和7年度から、砂防堰堤等が土石流を捕捉した場合の早期機能復旧を目的として、緊急除石が災害復旧事業の対象に追加された。当該事業を活用するにあたっては、定期点検による堆砂量の現状把握と被災時の迅速な堆砂量の推計が必要となる。しかしながら、県が管理する全砂防堰堤について実測等により堆砂状況を把握するには、膨大な時間と費用を要する。

本研究では、各出先機関に配備されている無人航空機（UAV）を活用した、堆砂量の効率的な推計手法を検討する。

今回は疑似堆砂を用いた空撮を行い、撮影データから堆砂量の算出を試行したので報告する。

キーワード インフラDX 土砂災害 維持管理

1. はじめに

令和7年度より、砂防堰堤等が土石流を捕捉した後の早期機能復旧を目的とした新規制度が導入された。本制度では、異常な天然現象によって発生した土石流等の捕捉後において、平常時から砂防堰堤の適切な除石管理等を実施しているものに限り、災害復旧事業として緊急的な除石が可能となった。これにより、被災後の施設の早期機能回復が期待されている。

一方で、和歌山県は急峻な山地が多く、土石流に対する土砂災害警戒区域は5,505箇所¹に及ぶ。また、県が管理する砂防堰堤は1,059基（令和6年3月時点）に上る。これら膨大な数の砂防堰堤について、実測等による堆砂状況を把握するには多額の費用と多大な時間を要するため、限られた予算と人員の中で効率的な管理手法を確立することが求められている。

本研究では、県の各出先機関に配備されている無人航空機（以下、UAV）を活用し、堆砂量を効率的かつ迅速に推計する手法を検討する。今回はその第一歩として、疑似堆砂を用いた空撮を実施し、得られたデータから堆砂量の算出を試行したので、その結果について報告する。

2. 調査および手法

（1）研究方法

和歌山県において、汎用的に配備・運用されているUAVの一つである「DJI製 Phantom 4 Pro+」を使用して研究を実施した。具体的には、疑似堆砂モデルの設置前後にそれぞれUAVによる写真撮影を実施し、SfM（Structure from Motion）処理により各段階の3次元モデルを作成した。次に、設置前後のモデルの差分から疑似堆砂量を推計し、実測値と比較することで推計精度を検証した。

（2）対象箇所

本試行は、那智勝浦町に位置する和歌山県土砂災害啓発センター（以下、当センター）に隣接する鳴子谷川において実施した。当該地は、平成23年紀伊半島大水害の被災地であり、現地には、砂防堰堤等の砂防施設が整備されている。現在は、土砂災害の脅威や砂防施設の重要性を伝える啓発活動の場として活用しており、山間部における砂防施設の堆砂状況を模擬した検証を行うのに極めて適した環境である。

（3）飛行条件

空中写真撮影にあたっては、被写体となる疑似堆砂モ

デルの詳細な凹凸形状を高精度に捉える必要があるため、カメラの向きを鉛直下向きに固定した。また、対地高度を20 m、飛行速度を約0.8 m/s、飛行ルートの間隔を8.0 m、シャッター間隔を5 秒枚に設定し、連続撮影により画像データを取得した。これらの飛行条件は、3次元モデルの作成精度を確保するために設定したものである。同一地点が多くの写真に含まれるほど点群精度が向上することから、オーバーラップ率80%以上、サイドラップ率60%以上を目標とした。

なお、これらの条件で試行した結果、オーバーラップ率は80%、サイドラップ率は73%となり、いずれも目標値を達成した。

(4) 疑似堆砂の設置および実測値の算定

本試行では、砂防堰堤における堆砂形状を再現するため、鳴子谷川の流路工内においてブルーシートを用いた疑似堆砂モデルを構築した。

a) 疑似堆砂の構築と構造

左右兩岸の既設護岸の天端を基準面とし、その上に木材(角材)による格子状のフレームを構築した。具体的には、護岸天端上に枠組みを設置するとともに、ブルーシートの自重によるたわみを抑制するため、流路を横断する方向に約2.0 m間隔で梁を架設し、枠組みと連結した(図-1)。このフレーム上面にブルーシートを隙間なく張設することで、流路を横断する平坦な堆砂面を模擬した(図-2)。



図-1 疑似堆砂モデルの設置状況



図-2 疑似堆砂モデル完成状況

b) 実測による基準値の算定

UAVによる推計精度の検証基準とするため、設置した疑似堆砂モデルの体積を実測に基づき算定した。算定にあたっては、梁を渡した各箇所計測断面を設定し、各断面における天端幅、敷幅および高さを実測した。

得られた値を基礎データとし、平均断面法により容積を算定した。算定の結果、疑似堆砂モデルの容積は67.556 m³であった(表-1)。

ただし、現地確認の結果、ブルーシートの一部に自重によるたわみが生じており、当該部分の体積は堆砂量として計上できないと判断した。そのため、たわみ部分の体積算定にあたっては、後述する Reality Capture (Capturing Reality社, Epic Games) のオルソ2D表示におけるMeasure機能を用い、各梁の設置断面および梁間の縦断方向に計測線を設定した。出力された断面プロファイルから0.1 m間隔の標高値を記録し、各断面のたわみ面積を算出した後、平均断面法により体積を算定した結果、たわみ部分の体積は3.171 m³であった(図-3)。

以上より、補正後の実測体積は、67.556 m³から3.171 m³を差し引いた64.385 m³を基準値として採用した。

表-1 疑似堆砂モデルの諸元および堆砂量計算結果

各断面(下流→上流)								
断面	天端幅(m)	敷幅(m)	高さ(m)	断面積(m ²)	断面積平均(m ²)	右岸(m)	左岸(m)	平均(m)
1	5.45	2.50	2.96	11.766	11.127	1.96	1.75	1.86
2	5.10	2.50	2.76	10.488	9.721	1.93	1.90	1.92
3	4.90	2.50	2.42	8.954	8.167	2.04	1.85	1.95
4	4.70	2.50	2.05	7.380	6.765	1.75	1.92	1.84
5	4.45	2.50	1.77	6.151				
合計								67.556

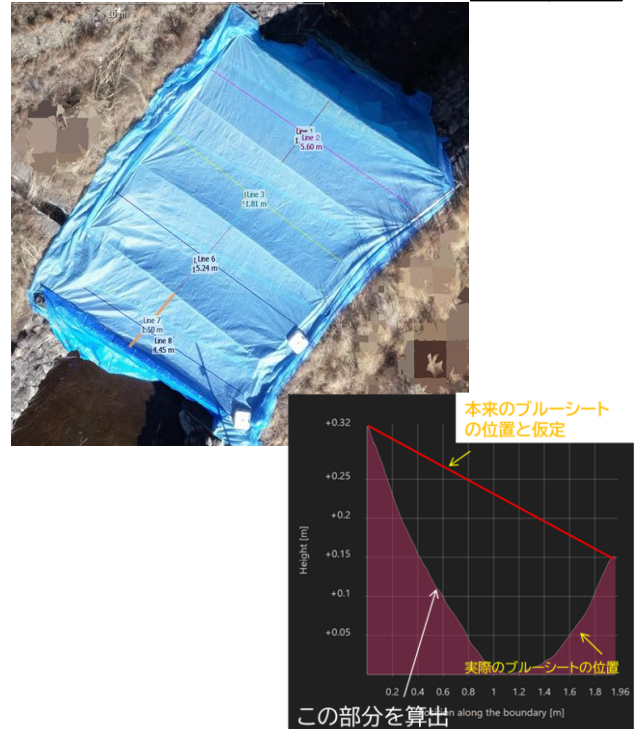


図-3 オルソ 2D 画像上の Measure 機能による計測線と断面プロファイル

(5) 解析手法

a) 3次元モデルの作成

疑似堆砂モデルの設置前後に取得した空撮画像を、フォトグラメトリソフトウェア Reality Captureにより処理し、それぞれの3次元点群データを作成した(図-4)。なお、Reality Captureはオルソ2D表示におけるMeasure機能を備えており、前述のブルーシートのたわみ量の算定にも使用した。

また、本試行では、各出先機関が特別な測量機材を用いずに実施可能な手法を検討することを目的としているため、RTK測位や地上基準点(GCP: Ground Control Point)の設置は行わず、各写真に記録されたGPS情報(EXIFジオタグ)のみに基づき位置情報を付与した。

b) 点群データの位置合わせ

GPS情報のみによる位置付与では、モデルの設置前後の点群データ間に水平方向および垂直方向の双方において無視できない位置ずれが生じた(図-5)。このため、点群処理ソフトウェアCloud Compare(オープンソースソフトウェア)のAlignment機能を用いて位置合わせを行った。

位置合わせにあたっては、まずReality Capture上で設置前後それぞれの3Dモデルを表示し、砂防堰堤の天端角部等、設置前後で形状が変化しない特徴点を目視により4点選定した。次に、選定した各特徴点の座標(X, Y, Z)をReality Capture上で読み取り記録した。Cloud

Compareの「Align (point pairs picking)」ツールにおいて、一方の点群データをReference entities(基準)、他方をAligned entities(移動対象)として設定し、記録した座標値をそれぞれの対応テーブルに手動で入力した(図-6)。その後、4組の対応点に基づく位置合わせを実行した(図-7)。

なお、使用した座標値は測量による実測値ではなく、Reality Captureの3Dモデルから読み取った値である。このため、位置合わせの精度はモデルの再構築精度および特徴点の選定精度に依存する。

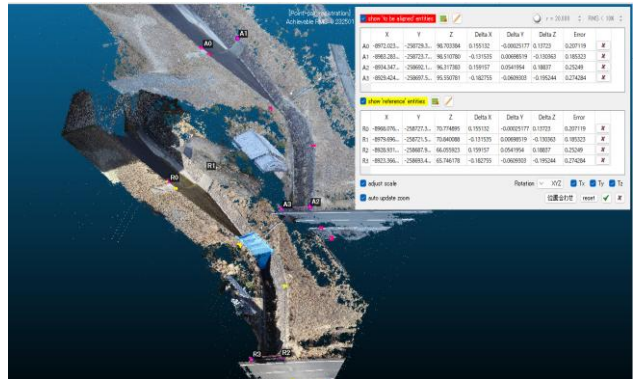


図-5 Alignment 機能における対応点の設定 (Cloud Compare) (キャプチャ画像)

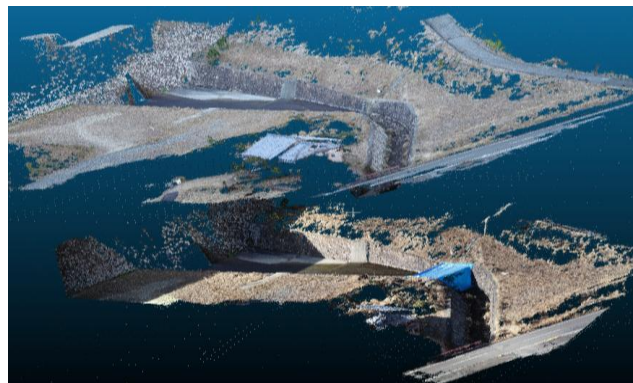
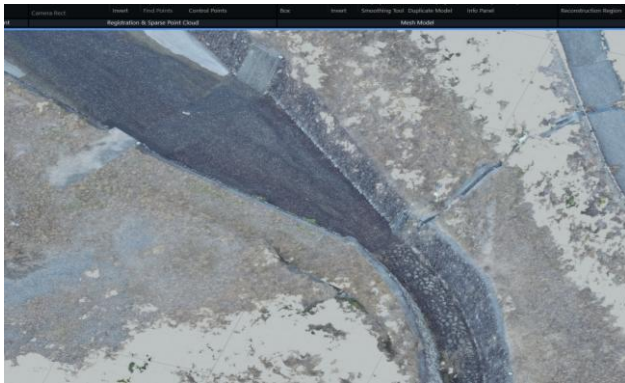


図-6 位置合わせ前の点群データの比較 (Cloud Compare) (キャプチャ画像)



(a) 疑似堆砂モデル設置前



(b) 疑似堆砂モデル設置後

図-4 3次元モデル作成結果(キャプチャ画像)

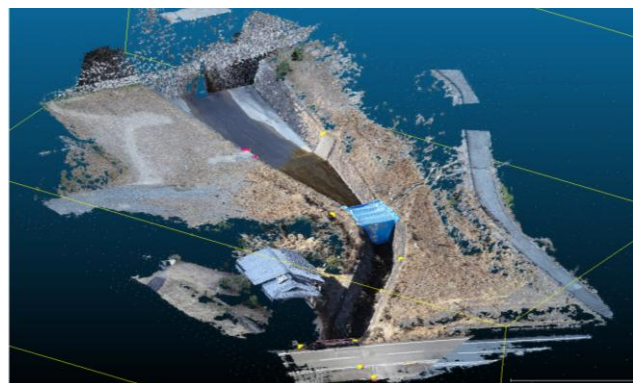


図-7 位置合わせ後の点群データの比較 (Cloud Compare) (キャプチャ画像)

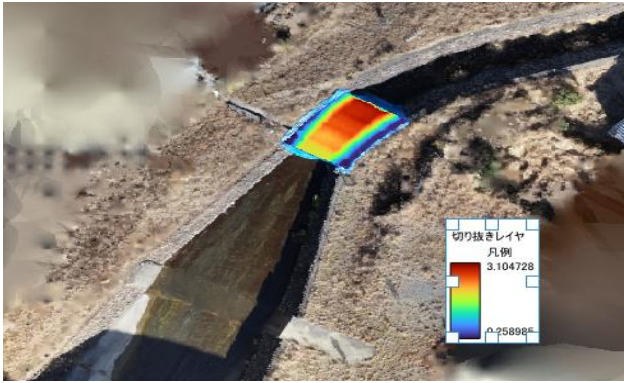


図-8 ラスタの抽出結果 (QGIS)
(キャプチャ画像)

c) 標高ラスタの作成と標高差分による体積算出

位置合わせ後の点群データについては、Cloud CompareのRasterize機能を用いて標高ラスタとして出力した。出力にあたっては、セルサイズを0.05 m (5 cm)、各セル内の点群の平均標高 (average height) を標高値として採用した。

作成した設置前後の標高ラスタをGISソフトウェアQGIS (オープンソースソフトウェア) に読み込み、ラスタ計算機を用いて差分 (「設置後ラスタ」 - 「設置前ラスタ」) を算出した。次に、疑似堆砂の設置範囲をポリゴンとして作成し、マスキングによる切り抜きにより当該範囲の差分ラスタを抽出した。抽出した差分ラスタに対し、QGISの「ラスタのサーフェス体積」機能を適用した。基準面の標高を0 mに設定し、差分ラスタの全セルの値の総和から体積を算出し、UAVによる疑似堆砂の推計体積とした (図-8)。

3. 結果

今回の手法による結果について、実測体積は64.385 m³であった。一方、UAVの写真データから算出した疑似堆砂の推計体積は65.276 m³であり、実測体積との差分は+0.891 m³、相対誤差は+1.38%であった。UAVによる推計体積は、実測体積に対してわずかな誤差であり、概ね良好な一致を示した。

4. 考察

UAV推計値と実測値の相対誤差は+1.38%と小さく、GCPおよびRTKを使用しない簡易手法としては十分な推計精度が得られたと考える。

一方、本手法における推計精度は、Cloud Compareの「Align (point pairs picking)」ツールを用いた位置合わせの精度に依存している。位置合わせにあたっては、Reality Capture上で設置前後の3Dモデルを表示し、砂防堰堤の天端角部等、設置前後で形状が変化しない特徴点を目視により4点選定している。そのため、選定する特徴点の位置や組み合わせによって位置合わせの精度が変化し、推計誤差に影響を与える可能性がある。特徴点の選定が適切でない場合には誤差が増大することが懸念されるため、より安定した精度を確保するためには、特徴点の選定基準の明確化や選定点数の増加が有効と考えられる。

また、本試行は疑似堆砂モデルを用いた小規模な検証であり、実際の土石流によって生じるような大規模な堆砂を対象としたものではない。実規模の堆砂量を対象とした場合、堆砂範囲の広域化や地形の複雑化に伴い、点群データの欠損や位置合わせ精度の低下など、本試行では顕在化しなかった誤差要因が生じる可能性がある。今後は実際の砂防堰堤における堆砂を対象とした検証を実施し、本手法の適用範囲と精度の限界を明らかにすることが課題である。

5. まとめ

本研究では、GCPおよびRTKを使用しない簡易手法として、UAVによる空撮画像からSfM処理を経て3次元点群データを作成し、差分解析により疑似堆砂の体積を推計した。実測値64.385 m³に対し推計値は65.276 m³であり、相対誤差は+1.38%と良好な結果が得られた。これにより、各出先機関が特別な測量機器を用いずにUAVで堆砂量を推計する手法の実用可能性が示された。今後は、実際の土石流による堆砂のような大規模な対象に対して本手法を適用し、対象スケールの違いが体積推計精度に及ぼす影響を検証することが課題である。

参考文献

- 1) UAVを用いた公共測量マニュアル (案) 平成28年3月 (平成29年3月改正) 国土交通省国土地理院 P.26