

過去の空中写真を用いた砂防堰堤堆砂敷における SfM 解析の検討事例について

熊本県土木部河川港湾局砂防課 木山和彦, 永野謙一, 芥川崇
八千代エンジニアリング株式会社 ○宮原海, 山田創太, 横尾公博

1. はじめに

令和2年7月豪雨において、西日本から東日本、東北地方の広い範囲で大雨に伴う土砂流出や洪水氾濫が多発し甚大な被害が発生した。球磨川水系万江川は、当該豪雨により山腹崩壊や土砂流出・氾濫による被害が発生した流域の一つであり、大規模豪雨後の土砂流出状態の遷移を踏まえた土砂流出対策として、大規模及び中小規模の降雨を想定した対策がそれぞれ検討されている。筆者らは、過去に撮影された空中写真を用いて Structure from Motion 解析 (SfM 解析) を実施し、大規模出水前における既設砂防堰堤堆砂敷での土砂堆積・流出状況の経年変化について検討を行ったのでその結果を報告する。

2. 令和2年7月豪雨の概要

検討対象である万江川は、流域面積が90.3km²、本川の流路延長が21.1kmの河川であり、熊本県南部に位置する球磨川の一次支川である。図-1に万江川全体流域図を示す。上流域には山地地形が広がっており、狭隘な谷を流下する河道沿いの段丘・平野等に保全対象家屋が点在している。下流域は人吉市街地が広がっており、氾濫平野に人家や公共施設が複数位置している。また、流域の中央を九州自動車道が縦断、下流で国道445号線とJR肥薩線が河道を横断している。砂防計画基準点より上流には、砂防堰堤13基（うち透過型2基）、治山堰堤が99基、その他の堰堤が15基、溪流保全工が約4km設置されている（令和6年度末時点）。

令和2年7月豪雨においては、7月3日から7月31日にかけて梅雨前線が日本列島に停滞し、複数の観測所で観測史上1位の降水量を更新する等、九州地方を中心に記録的な大雨となった。本報告の対象である万江川流域においても、7月3日から7月4日までの24時間の総降水量453mm（1/50～1/80程度）が観測されており、多数の斜面崩壊及び大量の土砂が河道へ流出する等の被害が発生した。大規模土砂生産イベントの直後には、流域内に不安定な土砂が堆積し、中小規模の出水によっても土砂流出が活発になる期間が生じることが考えられる¹⁾。したがって、経年的な土砂流出の推移を把握し、土砂流出が安定する時期、すなわち定常状態となる時期を予測することは、今後の土砂流出対策の実施において重要な課題である。

3. GNSS 測量について

SfM解析は、既存の航空写真等の画像データから数値表層モデルを作成する技術であり、近年、土木分野において広く活用事例が報告されている。一方で、既設砂防堰堤の堆砂敷における土砂動態把握においては、数センチ～数十センチ程度の精度管理が求められることから、SfM技術を活用した報告事例は極めて少ない。

本報告では、土砂動態把握にSfM解析を活用するために、解析精度向上を図ることを目的としてGCP（地上評定点）を複数設置することとした。また、GCPの設置に伴う評定点測量においては、利便性と効率性を重視し、人工衛星からの信号を用いて地上の現在位置を計測するシステムであり、標定点間の視通は不要であるGNSSネットワーク型RTK（Real-Time Kinematic）測量を採用した。

測量箇所は、先ず第一に通信環境が良好であることを条件として設定した。また、過去の空中写真に位置情報を付与することによるSfM解析の精度向上を目的としていることを踏まえて、過去の空中写真の撮影範

囲内、かつ、撮影時期から現時点までの間において不動と考えられる場所を対象に設定した。具体的には、既設砂防堰堤の水通し部及び袖部端部、既設砂防堰堤堆砂敷内の橋梁、道路役杭位置（現場状況から想定）等の過去から現在までにおいて地形変化がないものと想定される構造物を対象とした。GNSS測量の実施状況を図-2に示す。測量結果は、既設砂防堰堤の土砂堆積状況把握における精度向上に活用することを踏まえて、計画堆砂面付近の不動点を対象に複数箇所を選定した。



図-1 万江川全体流域図



図-2 GNSS測量実施状況

4. SfM 解析の実施手順とその結果、課題

4.1 SfM 解析の実施手順

本報告では、対象砂防堰堤竣工後の1959年から2009年の間に国土院の空中写真閲覧サービスで閲覧可能であった12時期の空中写真のうち、解像度が低いものや、ほぼ全面湛水しているために地形モデル作成困難と予想されるものを除いた8時期の空中写真（高解像度画像データ）を使用した。2009年以降については、対象箇所におけるLPデータにより土砂流出状況を把握可能であることから、SfM解析の対象から除外することとした。SfM解析には、代表的なソフトウェアであるMetashape (Ver. 2.1.3, Agisoft, Russia) を用いて以下の手順により作業を実施した。

①写真の読み込みとアライメント: 対象とする空中写真をMetashapeに読み込み、複数の航空写真のオーバーラップ部分から多数の同一地点（タイポイントという）を抽出し、特徴点のマッチングを行い、カメラの位置と姿勢を推定した。

②標定点の追加: 写真アライメントで作成されたタイポイントを基に、事前に行ったGNSS測量によって取得したGCPの座標情報を追加し、推定されたカメラの位置と姿勢を補正した。

③高密度点群の生成: アライメントとGCPの情報に基づき、密な点群（ポイントクラウド）を生成した。

表-1 SfM解析結果（年別標高差分値算出結果）

No	年	月	日	整理番号	年间隔	SfM解析結果		備考
						流出・堆積土砂量 m ³	流出・堆積土砂量 m ³ /年	
-	1959	-	-	-	9	-	-	万江川砂防堰堤2完成
1	1968	10	20	MKU-68-3X	5	51,834	10,367	
2	1973	5	21	MKUI-73-3X	3	-111,954	-37,318	一部流域内の写真無し
3	1976	10	21	CKU-76-08	7	104,431	14,919	
4	1983	5	18	MKU-83-4X	5	-20,882	-4,176	九州自動車道施工期間 1983~1995
5	1988	10	10	MKU-88-3X	7	-21,496	-3,071	
6	1995	10	10	MKU-95-2X	8	-117,506	-14,688	
7	2003	2	25	MKU-2002-9X	2	132,777	66,389	
8	2005	3	8	MKU-2004-6X	4	-41,954	-10,488	
-	2009	2	-	-	11	60,241	5,476	H21LP
-	2020	10	-	-				R02LP
-	2022	11	-	-	2	-20,639	-10,320	R04LP

④DSM（数値表層モデル）の生成:生成された点群から、DSMを作成した。

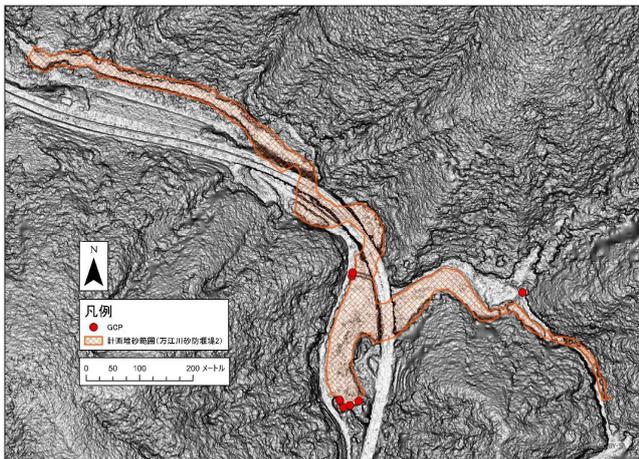
⑤オルソモザイク画像の生成:DSMと元の画像データを用いて、オルソモザイク画像を生成した。

⑥差分解析:各撮影時期のDSMを比較し、時間経過に伴う堆砂数の標高変化を解析することで土砂の堆積量・流出量を算出した。

4. 2 SfM解析結果と課題

SfM解析においては、GNSS測量によって取得した標定点の情報を解析に適用することで、解析結果の精度向上を図った。SfM解析を基に作成したDSMを抜粋して図-3に示す。解析結果から、既設砂防堰堤の堆砂数を含む河川沿いの谷底平野及び河岸段丘はDSMから読み取り可能な程度、既設砂防堰堤等の構造物は構造型式が確認できる程度のモデル化が実施されていることを確認した。一方で、河川両岸に位置する小規模な沢地形の表現は煩雑であることに加えて、周辺地形との標高差が表現されておらず、平滑な面としてモデル化されている箇所も認められる。SfM解析では、航空写真から特徴点を抽出し、それぞれの特徴点を関連付けすることでDSMを作成するという特性上、航空写真から読み取ることができない地形の正確なモデル化が困難である。具体的には、地形のオーバーハング部や影部、湛水地等においては特徴点の抽出及び関連付けが正しく実施されないことから、本報告におけるDSMでも平滑な面としてモデル化される箇所が発生したものと推察する。

図-3 SfM解析により作成したDSMモデル



差分解析結果から、既設砂防堰堤の堆砂数では砂防堰堤竣工後から流出と堆積を繰り返しながら変動していることが確認された。表-1に各撮影年間の流出・堆積土砂量の算出結果を示す。しかしながら、過去の航空機による空中写真を用いたSfM解析では、いくつかの課題も明らかになった。一般的なUAV写真測量と比較し、航空写真測量では対地高度が高く（300~3,000m）1枚当たりの撮影範囲が広いため、解析に使用可能な写真（対象物を撮影した写真）の枚数が少ないことが多く、SfM解析の精度が向上しにくいという点が挙げられる。また、対地高度が高いことから、航空写真の解像度は低い傾向にあること（航空写真：10~40cm程度、UAV測量：0.5~3.0cm程度）に加えて、カメラと対象物との距離の違いにより、撮影写真毎に地上画素寸法に差異が生じる場合があり、解析精度に影響を与える要因となる。本報告でも1時期あたり3~6枚程度の空中写真を用いて解析を行ったため、SfM解析結果の精度が向上しにくいという制約がある。各撮影年のSfM解析結果から得られた標高値を、変動がないと考えられる砂防堰堤上流の既設橋梁位置と比較した結果0.2mから最大3m程度の標高値の差異が確認された。この解析結果の差異が堆砂数内の土砂移動の経年変化の検討に影響を及ぼすことのないよう、最新のLP測量成果（令和4年度取得

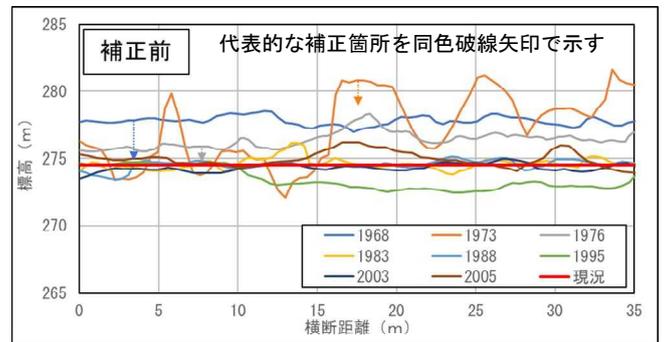


図-4 SfM解析結果（既設橋梁地点：補正前）

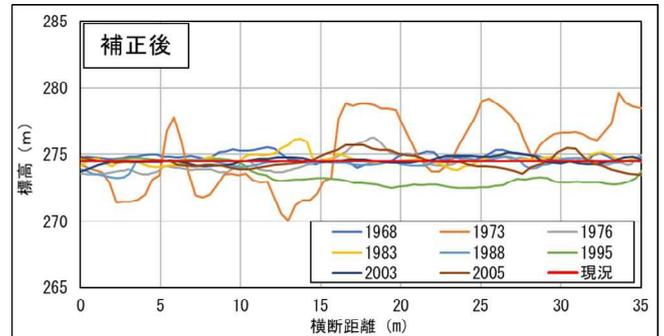


図-5 SfM解析結果（既設橋梁地点：補正後）

データ）で得られた現況の標高値に合わせて補正を行った。補正前後の断面図を図-4及び図-5に示す。

5. おわりに

本報告では、過去の空中写真を用いたSfM解析により、既設砂防堰堤堆砂数における土砂の堆積・流出状況の経年変化を把握した事例を示した。特にGNSS測量により精度向上を図った結果、土砂移動状況把握において一定の有効性を示した。一方で、航空写真を用いたSfM解析では、航空写真の解像度や撮影枚数に起因する精度や解像度の限界といった課題も存在することが明らかになった。今後は、検討事例の蓄積により解析精度を向上していくことが、砂防堰堤の維持管理や土砂流出状況把握、施設配置計画策定に活用する上で有効と考えられる。

参考文献

- 1) 国総研資料 第1115号 大規模土砂生産後に生じる活発な土砂流出に関する対策の基本的考え方(案), 2020.6