

UAV-SfMの山地溪流における発生・堆積流木量調査への適用性と課題

小柳賢太・山田 拓・石田孝司

1. はじめに

豪雨時に山地溪流で発生、流下、堆積する多量の流木は、土砂災害による被害を深刻化させる。災害後に発生流木量を精度良く算出することは、被災実態の把握や将来的な発生流木量の予測、流木対策施設の合理的な設計を行うために重要である。また応急対策に向けては、溪流内に残存する不安定な堆積流木量を計測することが重要である。

一方、災害後の山地溪流では、発生・堆積流木量の調査が困難な場合が多い。発生流木量の算出には、流木発生箇所と同様な植生を有する調査区画で、単位面積あたりの材積（枝葉や根茎を除いた幹部分の体積）を現地計測する手法（以下「サンプリング調査法」という。）が用いられることが多いが、広範囲での調査には時間を要する。また、災害後の溪流には土砂や流木が不安定な状態で残存していることから、堆積流木量の縦断的な計測には危険を伴う。

近年、UAV空撮画像とSfM（Structure from Motion）技術を組み合わせること（以下「UAV-SfM」という。）により、詳細な地理空間情報を容易に入手できるようになっている。比較的緩やかな海外の河川（河床勾配概ね2°未満）では、UAV-SfMを用いた堆積流木量の計測事例も報告されている^{例え1)}。しかし、土石流・流木災害が多発する急勾配の山地溪流（河床勾配概ね2°以上）におけるUAV-SfMの適用事例は少なく、UAV-

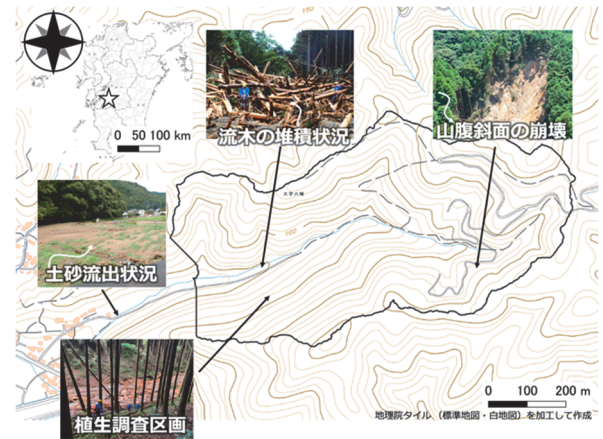


図-1 調査対象流域の位置と概要

SfMの適用性や課題は明らかになっていない。

そこで本研究では、令和2年7月豪雨により流木が発生した熊本県の佐敷川水系園口川流域（図-1）を対象に、UAV-SfMを用いて発生・堆積流木量を算出し（以下「UAV-SfM手法」という。）、既存手法の計測結果や作業時間と比較することにより、UAV-SfMの適用性や課題を考察した。

2. 研究手法

本研究では、既存手法とUAV-SfM手法の2通りで発生・堆積流木量を調査し、その精度や作業時間を比較する。既存手法は現地での計測を主とする一方、UAV-SfM手法には、災害前後に取得された5種類の地理空間情報（表-1）を用いた。数値表層モデルは樹冠の標高を表しており、災害前

表-1 UAV-SfM手法に用いた地理空間情報の一覧

種類	災害前			災害後	
	数値表層モデル	数値地形モデル	数値表層モデル	オルソ画像	三次元点群
計測方法	航空レーザ測量	航空レーザ測量	UAV-SfM	UAV-SfM	UAV-SfM
計測時期	H24.11～H25.10	H24.11～H25.10	R3.9	R3.9	R3.9
点群密度	約1点/m ²	約1点/m ²	約600点/m ²	—	約600点/m ²
空間分解能	1m	1m	0.5m	0.02m	—

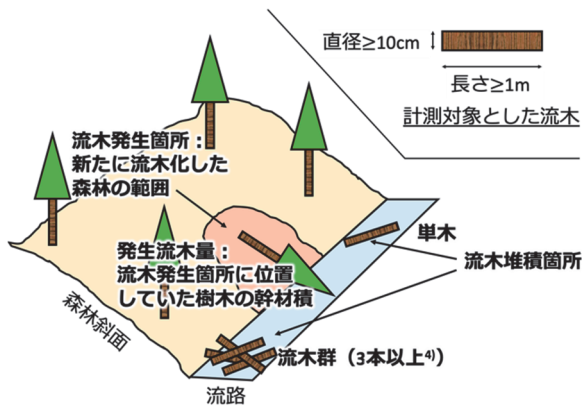


図-2 本研究で扱う用語の定義

後の標高変化から流木発生箇所を抽出するために用いた。災害前の航空レーザ測量で得られた数値表層モデルと数値地形モデルからは、流木発生箇所における発生流木量を算出した。また、災害後のUAV-SfMから得られたオルソ画像と三次元点群は堆積流木量の算出に用いた。本稿で扱う各用語の定義は図-2に示す通りである。なお、UAV-SfMにはUAV（DJI Phantom4 RTK）による空撮画像697枚と、写真測量ソフトウェア（PiX4Dmapper）を用いた。

2.1 調査地の概要

園口川流域（図-1）の集水面積は0.410km²、谷出口上流200mの平均河床勾配は3.8°である。令和2年7月豪雨では、最大24時間雨量425mm、最大1時間雨量87mm（いずれも気象庁アメダス田浦観測所）を記録し、災害直後の現地調査では山腹斜面の崩壊や土砂の流出、それらに伴う流木の発生や堆積が確認された（図-1）。

2.2 発生流木量の算出方法

本研究では、災害前後の標高変化から流木発生箇所を抽出した上で、流木発生箇所に位置していた樹木の材積を計算することで発生流木量を算出した。

流木発生箇所は、数値表層モデル（表-1）を災害前後で作成し、災害前後の差分解析から抽出した（図-3）。ここでは既往研究²⁾を参考に、災害後に数値表層モデルが8m以上低下した範囲を流木発生箇所と見なした。

流木発生箇所の材積は、既存手法とUAV-SfM手法でそれぞれ算出し、結果の誤差率を求めた。既存手法であるサンプリング調査法では、流木発生箇所に隣接した針葉樹林10m×10m×1区画

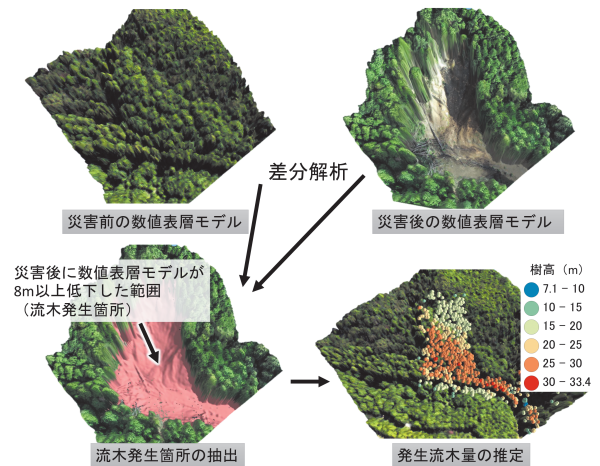


図-3 発生流木量の算出方法

（図-1）で単位面積あたりの材積を計測した上で、流木発生箇所の面積と乗じて発生流木量を算出した。UAV-SfM手法では、災害前の数値表層モデルと数値地形モデル（表-1）の差分から数値樹冠モデルを作成し、林業用の点群処理ソフトウェア（FUSION/LDV）を用いて樹頂点の抽出、樹高及び樹冠投影面積の計測を行うとともに、既存の材積推定式³⁾を用いた（以下「全数調査法」という。）。

2.3 堆積流木量の計測方法

本研究では、長さ1m以上、直径10cm以上の堆積流木のみを計測対象とした¹⁾。なお、本研究では既往研究⁴⁾を参考に、現地調査や災害後のオルソ画像から3本以上の流木が積み重なって堆積していた箇所を流木群、その他の流木を単木として分類し（図-2）、異なる手法を用いて計測した。

2.3.1 単木

単木は、既存手法とUAV-SfM手法で計測した1本ずつの長さ、直径、材積について、仮説検定（ウィルコクソンの順位和検定）を用いて比較した。既存手法では、全ての単木の長さ、平均的な直径を巻尺等により現地計測し、円柱に近似して幹材積を求めた。UAV-SfM手法では、災害後のオルソ画像（表-1）から判読できた単木について、直径、長さをGISソフトウェア（QGIS）上で判読し、円柱に近似して材積を算出した。

2.3.2 流木群

流木群は、既存手法とUAV-SfM手法で計測した合計材積について、絶対誤差と相関係数（ r ）を求めた。既存手法では、流木群に含まれる流木の材積を1本ずつ現地計測した上で、流木群ごと

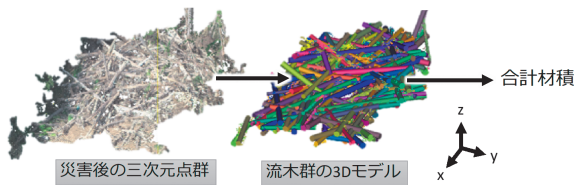


図-4 UAV-SfM手法による流木群の合計材積の算出

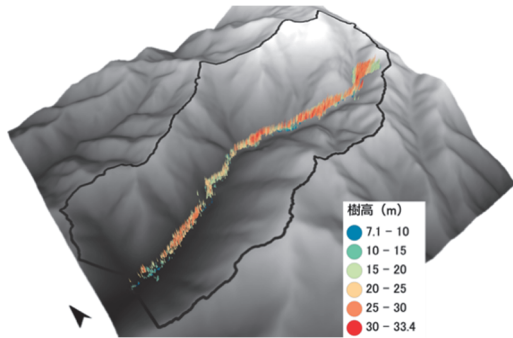


図-5 流木発生箇所における樹木の抽出結果

に合計材積を算出した。UAV-SfM手法では、災害後のオルソ画像（表-1）から堆積範囲を判読できた流木群について、堆積範囲内の三次元点群（表-1）を点群処理ソフトウェア（CloudCompare）に取り込み、流木群の3Dモデル⁵⁾を作成して合計材積を算出した（図-4）。

3. 結果・考察

3.1 発生流木量の算出結果

災害前後の数値表層モデルから、流木発生箇所が約1.6ha抽出された。これに、図-1の植生調査区画で得られた単位面積あたりの材積 $750\text{m}^3/\text{ha}$ を乗じた結果、既存手法であるサンプリング調査法からは $1,197\text{m}^3$ の発生流木量が算出された。一方、UAV-SfM手法を用いた全数調査法により抽出された流木発生箇所の樹木は計2,972本であり（図-5）、発生流木量は $1,099\text{m}^3$ と算出された。サンプリング調査法による発生流木量を真値と仮定すると、UAV-SfMを用いた全数調査法による発生流木量の誤差率は8.2%であった。

3.2 堆積流木量の計測結果

3.2.1 単木

既存手法により現地計測された単木は642本であった。一方、UAV-SfM手法により災害後のオルソ画像から判読できた単木は350本であり、現地計測に比べて292本少ない結果となった。仮説検定の結果、オルソ画像から判読できた単木1本あたりの長さ、直径、材積については、いずれも

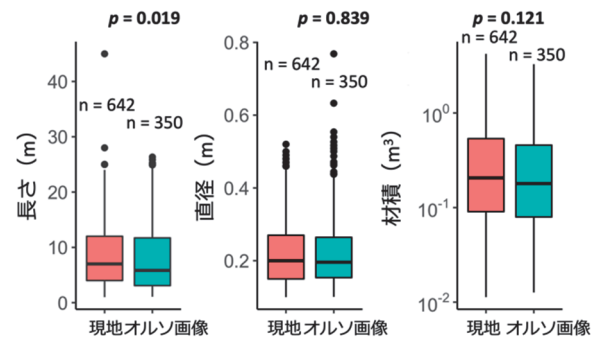


図-6 単木の計測結果

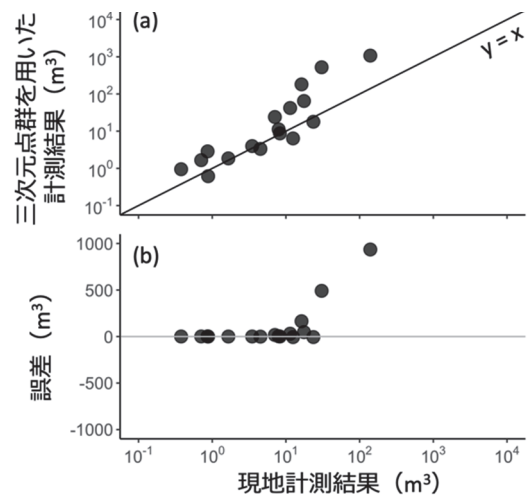


図-7 流木群の合計材積の現地計測結果と(a)三次元点群を用いた計測結果、(b)誤差（三次元点群を用いた計測結果－現地計測結果）の関係

p値が有意水準0.001より大きく（図-6）、現地計測結果との間に有意な差はないことが示された。

3.2.2 流木群

また、既存手法により現地計測された流木群は24箇所であった。一方、UAV-SfM手法により災害後のオルソ画像から判読できた流木群は17箇所であり、現地計測に比べて7箇所少ない結果となった。オルソ画像から判読できた流木群17箇所では、既存手法とUAV-SfM手法で求めた合計材積の絶対誤差は $0.2\sim 935\text{m}^3$ であり、両者には強い正の相関（ $r = 0.95$ ）があった（図-7）。

3.3 UAV-SfMの適用性と今後の課題

発生流木量については、既存手法とUAV-SfM手法の誤差率が8.2%であった（3.1節）。また、既存手法であるサンプリング調査法には4人日を要した一方、UAV-SfM手法による全数調査法は既存手法の1/8である0.5人日で完了した。この結果は、植生調査区画での現地計測を伴わないUAV-SfM手法により、既存手法と誤差率 $\pm 10\%$ 程

度の水準で発生流木量を算出できる可能性を示唆しており、UAV-SfMの活用は発生流木量調査の省力化に寄与すると考えられる。

堆積流木量については、既存手法とUAV-SfM手法で計測した単木1本あたりの長さや直径、材積の間に有意な差はなく（3.2.1項）、流木群の合計材積も17箇所中11箇所 10m^3 未満の絶対誤差であった（図-7）。また、単木と流木群の現地計測には計105人日を要した一方、UAV-SfM手法による単木と流木群の計測は3人日（既存手法の1/35）で完了したことから、UAV-SfMにより堆積流木量の計測時間を既存手法に比べて大幅に短縮できる可能性がある。

一方で、単木642本中292本（3.2.1項）、流木群24箇所中7箇所（3.2.2項）は災害後のオルソ画像から判読できず、UAV-SfM手法では計測することができなかった。計測できなかったこれらの流木は主に谷幅が狭く、上空が樹冠に覆われた地点に堆積していた。また、合計材積の大きい流木群では、流木群周辺の溪岸や樹木等が流木として誤検出されたことで、最大 $1,000\text{m}^3$ 程度の計測誤差（過大評価）が生じた（図-7）。これらは、河床勾配が 2° 以上であり急峻な地形を有する山地溪流に特有の技術的課題であると推測されるため、今後は堆積流木の計測精度が低下する条件を定量化することにより、堆積流木量がより効果的に計測できる可能性がある。

4. まとめ

本研究では、平均河床勾配が 3.8° である熊本県園口川流域において、既存手法とUAV-SfM手法による発生・堆積流木量の算出結果を比較した。発生流木量は既存手法との誤差率8.2%で算出することができ、作業時間も1/8程度に短縮された。堆積流木量についても、既存手法の1/35程度の作

業時間で計測できた。一方、UAV-SfM手法では単木292本と流木群7箇所が計測できず、また、流木群の合計材積が過大評価される可能性も示された。そこで今後は、地形・植生条件とUAV-SfM手法による計測精度の関係を分析するとともに、地上型レーザスキャナ等を活用した堆積流木量の計測手法についても検討を進める予定である。

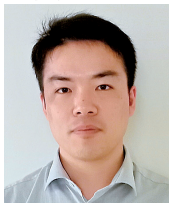
謝 辞

現地調査並びにUAV-SfMには熊本県砂防課にご協力いただきました。また、航空レーザ測量成果は国土交通省川辺川ダム砂防事務所よりご提供いただきました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Sanhueza D, Picco L, Ruiz-Villanueva V, Iroumé A, Ulloa H, and Barrientos G: Quantification of fluvial wood using UAVs and structure from motion, *Geomorphology*, Vol.345, 2019
- 2) Steeb N, Rickenmann D, Badoux A, Rickli C, and Waldner P: Large wood recruitment processes and transported volumes in Swiss mountain streams during the extreme flood of August 2005, *Geomorphology*, Vol.279, pp.112–127, 2017
- 3) 伊藤拓弥、松英恵吾、内藤健司：航空機LiDARによる森林資源量推定—スギ・ヒノキの樹高・樹冠量による立木幹材積推定式の検討—、写真測量とリモートセンシング、第47巻、第1号、pp.26～35、2008
- 4) Livers B, Lininger KB, Kramer N, and Sendrowski A: Porosity problems: Comparing and reviewing methods for estimating porosity and volume of wood jams in the field, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.45, No.13, pp. 3336–3353, 2020
- 5) 小柳賢太、山田拓、石田孝司：三次元点群からの物体検出による堆積流木量の推定：青森県むつ市小赤川橋の事例、R4年度砂防学会研究発表会概要集、pp.201～202、2022

小柳賢太



土木研究所 土砂管理研究グループ火山・土石流チーム
研究員
KOYANAGI Kenta

山田 拓



土木研究所 土砂管理研究グループ火山・土石流チーム
主任研究員
YAMADA Taku

石田孝司



土木研究所 土砂管理研究グループ火山・土石流チーム
上席研究員
ISHIDA Koji