

UAVを用いた山地河川の3次元モデルに基づく 土砂動態の定量評価

EVALUATION METHOD OF SEDIMENT MOVEMENT IN MOUNTAINOUS BASIN
USING 3D GROUND DATA OBTAINED BY UAV

馬場 亮¹・中西 隆之介¹・三谷 泰浩²・池見 洋明²

Akira BABA, Ryunosuke NAKANISHI, Yasuhiro MITANI and Hiroaki IKEMI

¹九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: akira.baba.274@s.kyushu-u.ac.jp

²九州大学工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

Key Words: sediment dynamics, UAV, GIS, three-dimensional model

1. はじめに

近年, ダム貯水池における土砂の堆砂による利水・治水容量低下などの問題が顕在化しており, ダム堆砂は経年的に増加している¹⁾. 宮崎県北部の耳川流域においては, このような堆砂問題への対策として既設のダムに排砂・通砂機能を付加したダムの運用・計画が進められているが²⁾, ダム通砂運用による貯水池下流の河道形状や河床材料の変化, 生態系への影響など, 土砂動態に関しては未解明な点が多い. 効果的な通砂運用を行うためには, 土砂流出量の把握が重要な要素の一つとなるが, これを評価する方法はいまだに確立していない. 一般的に, 支流の流域面積が土砂流出量の指標であると考えられているが³⁾, 実際には降雨やそれに伴う河川の流量の変化なども影響を及ぼしている. また, 流域の地質が土砂流出量に影響を与えることも既往の研究より明らかになっている⁴⁾. このような土砂動態の把握のためには, 地質の異なる流域において降雨や出水の前後に高頻度で河床変動の観測を行うべきであるが, 定期縦横断測量では砂州などの変化の激しい箇所や短期間での経年変化を捉えることが難しい. そこで, 高密度かつ高頻度で比較的容易に地形を観測することができる技術として, 無人航空機 (UAV) が河川管理においても注目されている.

本研究は支川から流出する土砂量の評価手法の開

発を目的とする. 流域面積が同程度で地質が異なる2つの支川を対象として, UAVを用いて定期的に河床の撮影を行い, 各観測期間の3次元モデル及び数値標高モデル (DEM) を構築し, 2時期のDEMから差分解析を行い, 河床変動量を求めた. なお, 撮影に際しては水文観測も行った. そして, 1次元河床変動計算を行い, この結果とUAVを用いて把握した河床変動とを比較して妥当性を検証し, 妥当性の高い計算結果からパラメータを同定し, 土砂流出量を求めた. 最後に, いくつかの課題に向けた取り組みの現況について述べた.

2. 対象流域と観測地点

対象流域は宮崎県北部の耳川流域の川内川と増谷川の2つの支川流域である. 図1に示すように, 2つの支川流域は流域面積が同程度であり, 河川の流下方向も同様の方向となっている. いずれの支川流域も斜面崩壊が広範囲で発生しており, これらは土砂の生産源となりうるため, 土砂流出の活発な流域であると予想される. また, 地質については, 川内川の表層地質は四万十累層群北帯砂岩を主体としており, 四万十累層群泥岩を多少含む構成である一方, 増谷川はその大部分が泥岩である. 耳川流域における既往の研究より, 地質の違いが土砂流出量の評価における重要な要素であることが明らかとなってい

る⁴⁾。以上の理由から、同程度の流域面積かつ流域の地質が異なるという点を考慮して、2つの支川流域を選定した。また、各流域を縦断的に踏査し、大規模な砂州が形成されており短期間における河床変動が期待される地点を1箇所選定し、それぞれの観測地点とした。概要を表1に示す。

3. 手法

(1) UAV を用いた空中写真の撮影

河床変動量は UAV を用いて撮影した空中写真から 3次元モデル及び DEM を構築することで評価する。高密度かつ高精度な標高値の取得方法としては、従来の計測手法であるトランシット測量や GPS 測量と比較して地形を詳細に調査できる地上レーザ測量が一般に用いられている。しかし、山地河川のような植生の多く急峻な地形では、危険な場所に立ち入らなければならなかったり、必要な箇所を計測できない可能性が生じる。そのような場所では、UAV を用いることで実際に危険箇所立ち入ることなく短時間で観測を行うことができる。UAV は航空測量と比較して機動性が高く、狭い範囲を対象に低空から詳細な画像を短時間で取得することができるため、写真測量に用いる例も増加している。

(2) 3次元モデルの構築

河川の3次元モデルは SfM ソフトウェアを用いて構築する。SfM は複数の写真から特徴点を抽出してカメラの位置や姿勢を求めるとともに、それに基づき空中写真から高密度に3次元点群を生成し、3次元形状を作成する技術である。SfM ソフトウェアの処理を図2に示し、以下に本研究における流れについて説明する。

a) UAV を用いた空中写真の撮影

UAV を用いて河床の垂直写真及び斜め写真(45度)を撮影した。撮影時間は1つの観測地点につき10分程度である。UAV はカメラ(1/2.3" CMOS, 有効画素数 12.4M)を搭載した DJI 社製 Phantom 3 Professional を使用した。また、写真の撮影ごとに GPS の位置情報が登録されるが、この場合の GPS の位置精度は1周波によるものであり、生成する3次元モデルと比較すると精度が著しく劣るため GPS の位置情報は使用しない。

b) 空中写真の選別

白飛びや黒潰れにより大部分の情報が欠損した写

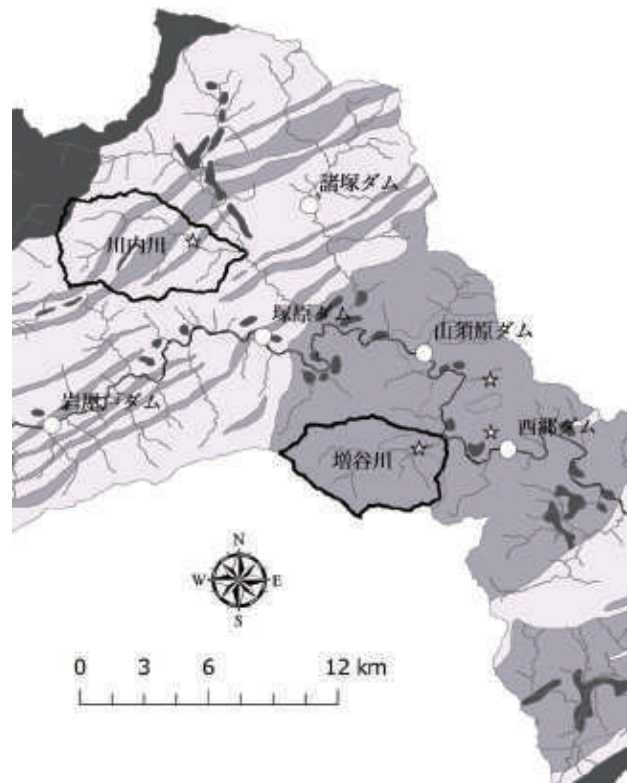


図1 対象流域の地質図及び観測地点

表1 対象流域及び観測地点の概要

	川内川		増谷川	
	流域全体	観測地点	流域全体	観測地点
地質	四万十累層群北帯砂岩		四万十累層群北帯泥岩	
面積	20.3 km ²	1,700 m ²	18.7 km ²	1,050 m ²
流路長	10.66 km	70 m	7.43 km	81 m
河床勾配	0.060	0.007	0.067	0.022
川幅	-	18 m	-	13 m
河口からの距離	-	2.19 km	-	1.08 km

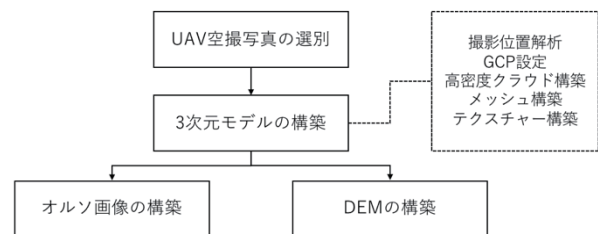


図2 オルソ画像及びDEM構築のフロー図

真、ピンボケやブレの発生した写真のほか、光の水面反射や消散などによる河床が明瞭に写らないものは使用しない。また、SfM ソフトウェアは自動処理

により空中写真間の特徴点の対応付けを行うため、経時変化や移動体など空中写真間で写っている状況が異なると不具合が発生するため、これらを回避する。天候も SfM において重要であるため、2 つの観測地点における撮影もほぼ同時刻に行う。それぞれの観測地点における撮影枚数は約 600 枚ずつであるが、3 次元モデルを構築するために選択した写真はそのうち 200 枚前後とした。

c) 3 次元モデルの構築

3 次元モデルの構築は 4 つの過程に分かれており、これらの処理は SfM ソフトウェア (Agisoft 社製 PhotoScan Professional Edition) により全自動で行われる。まず、空中写真の撮影位置を自動的に解析して点群を生成する。次に、高密度クラウド構築が行われ、写真からさらに高密度な点群を生成する。さらに、メッシュ構築により地形表面のメッシュが生成され、最後に、テクスチャー構築によって作成された地形表面に高品質な写真が張り付けられる。

d) 地理空間座標の設定

本研究では、UAV 搭載の GPS の位置座標は使用しないため、構築された 3 次元モデルはスケールを持たない。したがって、A3 サイズの+型対空標識を地上基準点 (GCP) としてそれぞれの観測地点で 10 点ずつ設置し、レーザー距離計 (Laser Technology 社製 TruPulse 360) を用いて GCP の測量を行った。その最小計測単位は 10 cm であるため、DEM においても 10 cm 程度の誤差が見込まれる。

e) オルソ画像の構築

写真を合成処理し、地形表面のオルソ画像 (正射投影画像) を構築して出力する。各観測期間のオルソ画像を比較することで、表層の河床材料の粒径や移動する土砂の最大粒径を把握することができる。川内川の観測地点のオルソ画像を図 3、増谷川の観測地点のオルソ画像を図 4 に示す。

f) DEM の構築

SfM で構築した 3 次元モデルはそのままでは河床変動量の算出に使用することができないため、DEM を構築して出力する。また、3 次元モデルは河床や植生の標高値が混在するため、SfM ソフトウェア中において高密度点群をオルソ画像と比較し、河床や植生に分類を行った上で、不要となる植生の標高値を手動で消去する。

(3) 標高値の算出と補正

河床変動量は地理情報システム (GIS) を用いて DEM の差分を計算することで求める。GIS は、位置に関する情報を持つ空間データを用いて分析を行える

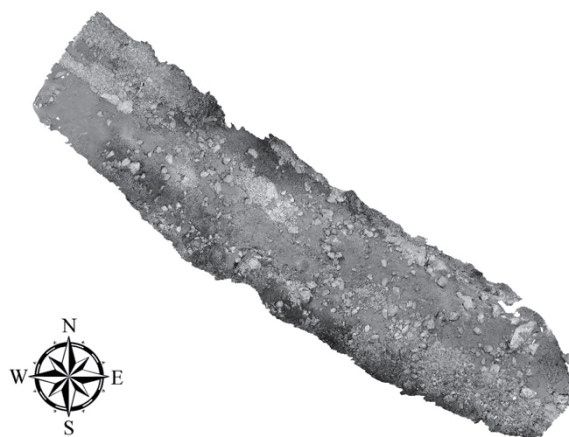


図 3 川内川の観測地点のオルソ画像



図 4 増谷川の観測地点のオルソ画像

技術である。本研究では、ESRI 社製 ArcGIS for Desktop Advanced を使用する。構築した DEM は行と列の格子状に並ぶセルで構成されるラスターデータであり、それぞれのセルが 1 つの標高値を持つ。構築した DEM のセルサイズは全て 2 cm であるが、GIS ソフトウェアを用いて 10 cm に変更した上で計算する。また、写真測量で得られる水深については、光の水面屈折により過小評価されるため、一般的に水の屈折率を空気の屈折率で除した値 1.34 を乗ずることで真の水深を得られる⁶⁾。このような水面屈折補正を検討すべく、水底に 16 点の GCP を設置し、スタッフを立てて定点からレーザー距離計で計測することにより実際の標高値を得た。そして、構築した DEM を補正した標高値と補正なしの標高値を比較した結果、補正した DEM と実測値との各点の標準誤差が 0.05 m、補正なしの DEM と実測値との各点の標準誤差が 0.04 m と、補正をしていない DEM が実測値に近い値

を示したため、補正をしていないDEMを使用した。

4. 河床変動の観測

(1) 現地観測による所見

観測はそれぞれの支川について、2016年7月26日、9月30日、10月7日、11月29日の計4回実施した。増谷川においては、河床の変化が顕著であり、特に9月30日の観測では堆積した土砂により砂州が拡大していること、粒径50cmほどの礫も移動していることを確認した。一方、川内川の河床は著しい変化は確認できず、点在する粒径1mほどの巨礫の裏に砂が堆積している程度で砂州はなく、観測期間を通じて大きな変化は確認されなかった。

(2) DEMを用いた河床変動量の算出

河床変動量はGISを用いてDEMの差分として算出された。さらに、5章において1次元河床変動計算による河床変動と比較を行うため、GISを用いて観測地点における河床変動量の相加平均値を算出した。その結果を表2に示す。増谷川の7月26日から9月30日の間の河床変動量は、平均化すると+0.15mであるが、堆積部と侵食部に区分した場合、それぞれ+0.98m、-0.35mと大きく変化していることがわかった。なお、9月30日の観測及び10月7日の観測の間における河床変動量は、時間間隔も短く降雨も発生していないため小さくなると考えられる。実際、その間の川内川における河床変動量は+0.09mであり、増谷川における河床変動量は-0.01mであったため、河床変動はほとんどなかったと言える。

5. 土砂流出量の評価

(1) 1次元河床変動計算モデル

2つの支川を対象として1次元河床変動モデルを構築し、土砂流出量の計算を行う。ここでは、国立研究開発法人土木研究所の1次元貯水池河床変動計算プログラムを使用する。本プログラムの土砂輸送

表2 算出した河床変動量の相加平均値

	7/26-9/30		9/30-11/29	
	堆積部 (m)	侵食部 (m)	堆積部 (m)	侵食部 (m)
川内川	+0.02	-0.26	+0.02	0.25
	-0.21		-0.14	
増谷川	+0.66	-0.09	-0.32	+0.04
	+0.15		-0.28	

表3 設定した土砂供給量のパターン

土砂供給量 (m ³)	支川	川内川	増谷川
	S	2,000	1,000
	M	4,500	115,000
L	7,000	220,000	

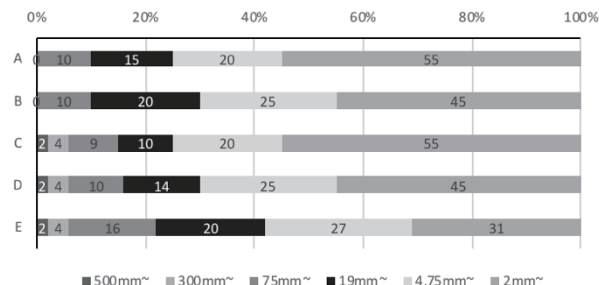


図5 設定した粒度分布のパターン

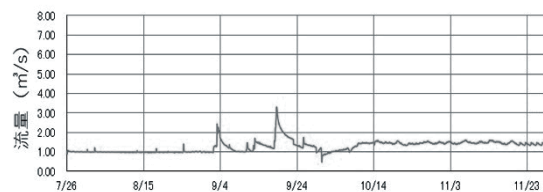


図6 川内川の観測流量

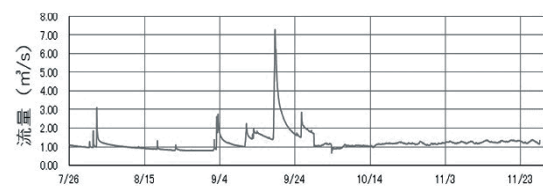


図7 増谷川の観測流量

は、混合粒径を用いており、掃流砂及び浮遊砂の土砂輸送形態を取り扱うことができる。1次元河床変動計算は河川の横断形状、上流端からの供給土砂の土砂量及び粒度分布、流量をパラメータとして要する。河川の形状については、1m間隔のLiDARデータ(平成23年)を用いて作成し、さらに現地観測において各設定断面の基岩(固定床)を計測して修正した。また、各支川について計算格子は観測地点上を含め、上流端から下流端まで格子間隔を300m~400mとし、川内川において19点、増谷川において14点を設定した。供給土砂の粒度分布はオルソ画像から移動する土砂の最大粒径を把握し、観測地点より得たサンプリング試料を基に5パターン設定した(図5)。また、上流端から供給される土砂量については、10年間のダム貯水池の各年堆砂量データと流域面積、降水量との統計から3パターン設定した(表3)。これらのパラメータの組み合わせをパラメトリックに変化させて河床変動計算を行い、観測地点の河床変動量と

計算された河床変動量が最も近いものでパラメータを同定する。流量は観測地点で連続的に観測した水位と塩分希釈法により算出した流量を用いた時系列データを使用した⁵⁾ (図6及び図7)。

(2) 1次元河床変動計算の結果

7月26日から9月30日、9月30日から11月29日の2期間を対象とした1次元河床変動計算により土砂流出量を算出した。まず、7月26日から9月30日の1次元河床変動計算において供給土砂量及び粒度分布のパラメータの組み合わせをパラメトリックに変化させ、観測した河床変動を再現することでパラメータを同定した。次に、それにより変化した河床高や河床材料の粒度分布を初期条件として9月30日から11月29日の1次元河床変動計算を実行した。この結果、採用したパラメータ及び1次元河床変動計算により算出した河床変動量は表3のようになった。また、算出した各支川末端からの流出土砂量は図8、粒度分布は図9のようになった。7月26日から9月30日の期間について見ると、川内川の流出土砂量は2,027 m³であり、増谷川の流出土砂量は13,010 m³と、増谷川が卓越している。また、9月30日から11月29日については、川内川の流出土砂量は1,430 m³、増谷川の流出土砂量は1,429 m³と同程度の結果が示された。土砂の粒径に着目すると、川内川では、現地観測の所見と同様に2 mm以下の砂が大きな割合を占めており、粒径が2 mm程度の砂が堆積するのではなく下流へ運搬され流出していることが予測される一方、増谷川では、全体的に河床が上昇しており大きな礫も移動しているという結果になった。

6. モデルの精度向上に関する取り組み

(1) モデルの精度に影響を与える因子

提案した土砂流出量の評価手法については、精度という点においていくつかの課題が残されている。例えば、UAVに搭載するカメラや撮影条件、SfMソフトウェアの設定に起因する3次元モデルの精度が挙げられる。3次元モデルの精度が低ければ、DEMを用いて計算する際に河床変動量を過小あるいは過大評価してしまう場合がある。現在、UAVに搭載するカメラを改良することで、どれ程の精度向上が見込まれるかを検証している。

(2) 写真の改良による精度向上

図1に示す観測地点において、引き続き2017年7

表3 採用パラメータと計算した河床変動量

	川内川		増谷川	
	河床変動量 (m)	採用パターン	河床変動量 (m)	採用パターン
7月26日～9月30日	-0.1	S-C	+0.15	L-E
9月30日～11月29日	-0.1		-0.1	

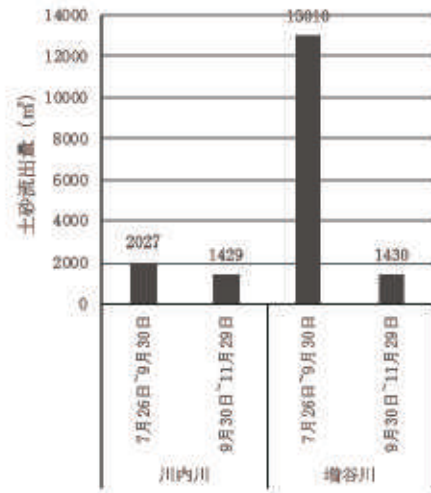


図8 算出した土砂流出量

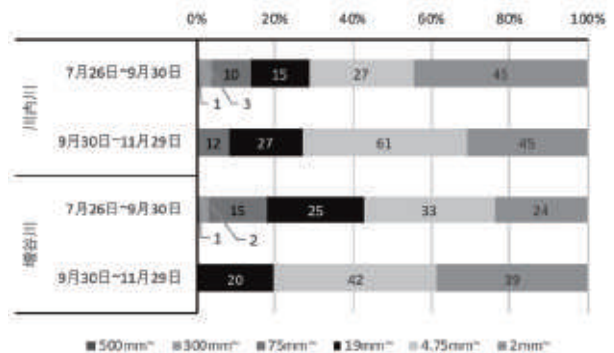


図9 算出した流出土砂の粒度分布

月7日、8月29日、10月26日に観測を実施した。また、UAVはDJI社製Inspire 2を使用し、カメラはDJI社製ZENMUSE X4S(1" CMOS,有効画素数20M)を搭載した。このカメラは、メカニカルシャッターを備えており、従来のローリングシャッターにおいて発生する、高速に移動しながら撮影することで画像に歪みが生じる現象を抑えることができる。これは、3次元モデルから構築するオルソ画像の解像度を向上させ、画像解析により表層の河床材料の時空間的な変化をより詳細に把握できるなど、数値計算モデルへの適用や土砂動態の把握といった可能性をますます広げる。さらに、撮影の形式をこれまでの

JPEG から RAW へと変更し, Adobe 社製 Lightroom Classic CC を用いて図 10 のように輝度ヒストグラムを参考に現像処理を行うことで黒つぶれと白飛びを除去した. これにより, SfM ソフトウェアによる写真のマッチングの精度も向上したものと考えられ, 3次元モデル自体の誤差についても 3.8 cm から 1.9 cm と小さくなった. また, 水面下の標高値に関する検証についても, 図 11 のように水底の 8 点に検証点を設置し, これを 3次元モデルにすることで改めて実測値と比較し, 検証を行った. 実測値については, JAVAD GNSS 社製 DELTA 受信機を使用し, GNSS により各検証点の位置を計測した. その結果を表 4 に示す. 補正なしの DEM と実測値との各点の較差の平均は従来のレーザー距離計とスタッフを用いた手法と比較して 0.11 m から 0.04 m へと向上し, 河床の標高値の信頼性も増した. なお, 水深補正を施した際の較差の平均は 0.05 m, DEM における水平誤差は 0.03 m であった. 実際, 水面下の河床材料を高解像度で撮影できており, SfM ソフトウェアにおいて高密度な点群を構築できていると考えられる. この 3次元モデルにおける精度, すなわち誤差を小さくすることは, 短期間における河床変動を考慮する場合や構築したオルソ画像から画像解析により粒度分布を把握する際に有効であると考えられる.

7. おわりに

本研究では, 川内川と増谷川の 2つの支川を対象として, UAV 観測により構築した 3次元モデルから算出した河床変動量に基づき, 前期 (7月 26日-9月 30日) の出水を対象として 1次元河床変動計算を行うことで, 供給土砂量及び粒度分布のパラメータを

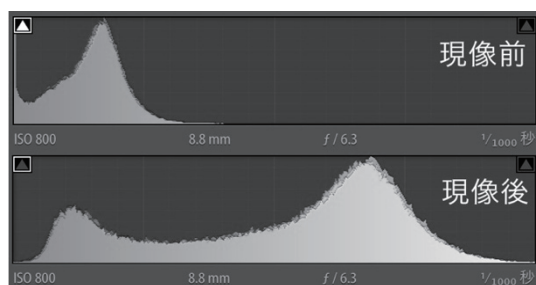


図 10 現像前後のヒストグラムの変化

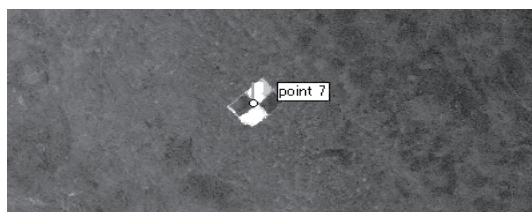


図 11 3D モデル化した水底の対空標識

表 4 GCP の計測値と DEM 値の比較表

GCP 番号	計測河床高 (m)	DEM 値 (m)	DEM との較差 (m)
1	2.37	2.29	0.08
2	2.83	2.80	0.03
3	2.19	2.17	0.02
4	2.33	2.24	0.09
5	2.41	2.35	0.06
6	2.80	2.80	0.00
7	2.82	2.80	0.02
8	2.78	2.77	0.01
較差平均(m)			0.04

同定し, さらに後期 (9月 30日-11月 29日) の流出土砂量を算出した. この結果, 堆積及び侵食の傾向を概ね再現し, 川内川と増谷川は同程度の流域面積でありながら前期において増谷川の方が土砂流出量が卓越していることが示唆された. 支川の土砂流出量を数値計算する上で支川そのものの河道変化を捉えることは重要であるため, 今後は UAV による 3次元モデルのさらなる有効活用と河川に適用する際の検証, 精度向上の検討を行い, その結果と土砂流出現象に寄与する因子を関連付けて土砂流出量の予測式の構築に取り組む. また, 河床変動計算の再現性を平均河床高のみで検証しているという課題について, UAV の観測地点をさらに追加し, 2次元河床変動計算の結果と比較することで, 河床変動量のみならず, 侵食部と堆積部や粒径の分布についても議論する.

参考文献

- Anton, J.S., Mario, J.F., Carmel, J. and Giovanni, D.C. : Reservoir sedimentation, Volume 54, pp.595-614, 2016.
- 吉武宏晃 : 耳川水系ダム通砂における土砂管理のための貯水池への流入土砂量把握に関する研究, 電力土木, Volume 373, pp.28-32, 2014.
- 高橋保 : 土砂流出現象と土砂害対策, 近未来社, 2006.
- Nakanishi R. : A study on the relevance of geology and sediment discharge in mountain watershed of Shimanto accretionary complex, Proc. Asian Regional Conference of IAEG, Geohazards and Engineering Geology, CDROM, 2015.
- T.J. Day : Field Procedures and Evaluation of a slug dilution gauging method in mountain streams, Journal of Hydrology New Zealand, 16, 113-133, 1977.
- Tanaka K. : 写真測量とリモートセンシング, 14(3), pp.1-9, 1975.

(2018. 5. 18 受付)