

小型ドローン空撮機及び数値解析モデルを活用した山地河川の土砂管理に関する一考察

COMPREHENSIVE SEDIMENT CONTROL MANAGEMENT IN MOUNTAINOUS WATERSHED USING SMALL UAV AND NUMERICAL SIMULATION MODEL

原田 紹臣¹・中谷 加奈²・里深 好文³・水山 高久⁴

Norio HARADA, Kana NAKATANI, Yoshifumi SATOFUKA and Takahisa MIZUYAMA

¹正会員 博(工) 三井共同建設コンサルタント株式会社(〒552-0007 大阪市港区弁天1-2-1-1000)

²正会員 博(農) 京都大学大学院農学研究科 助教(〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

³正会員 工博 立命館大学理工学部 教授(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

⁴非会員 農博 政策研究大学院大学 特任教授(〒106-8677 東京都港区六本木7-22-1)

It is important for improvement of flood control and environment in river basin to control sediment outflow using prediction and monitoring of sediment outflow in a mountainous watershed. For comprehensive sediment control management in river basin, numerical models to predict flood and sediment outflow have been proposed; however, these models have not been used on previous SABO action plans. On the other hand, the air photo survey has been cheap and easy to use practical Unmanned Aerial Vehicle developing technology of gyro sensor and electromagnetic motor of UAV. In this paper, we predicted flood and sediment outflow based on rainfall, topographical conditions and SABO dams using previous numerical models for mountainous watersheds. Furthermore, the new survey method of sediment outflow in mountainous watersheds using small UAV was proposed.

Key Words : Comprehensive sediment control, river system SABO, SABO dam, simulation, UAV

1. はじめに

流域における土砂管理の一貫として古くから、過剰な土砂流出に伴う下流域における影響や被害の軽減を目的に、上流の山地河川等における山腹工や土砂流出調節施設(砂防堰堤等)による水系砂防事業が進められてきた。一方、一部の流域ではダム建設等に伴って流域内の土砂動態が顕著に変化し、水系砂防事業計画の見直しや中断が求められている。特に、過去に策定された水系砂防計画において、洪水や土砂流出の時間的な変化や河床粒径の違いが河床変動に与える影響等に関して殆ど考慮されておらず、流砂の総流出のみを対象にした議論のため、土砂調節施設を過剰に計画されていることが考えられる。この場合、事業途中において既に構築された一部の既存土砂調節施設の効果により、下流基準点での土砂流出量が計画に対して低減していることが懸念される。そこで、水系砂防計画において数値解析手法^{例えば、1), 2)}等の活用による時間的な変化を考慮した計画立案が望まれる。

一方、流域内の土砂動態やその変化を把握するために、観測計器等を用いた連続的なモニタリング手法(流量・

流砂観測³⁾)が提案されている。ただし、これらの観測結果は各地点における流出量であり、問題となる地点(例えば、本川合流部)における時間的な河床変動等の把握が難しく、更なるモニタリング手法の拡充提案が望まれる。また、気象変動に伴う想定外の洪水にも対応するため、管理者は出水直後における現況把握が必要となる。そこで、近年、低コストにより土木分野でも活用が期待されているドローンを活用した水系砂防におけるモニタリング手法の提案が考えられる。ただし、利用されているドローンは大型で高機能を保有した機体が多く、飛行に際して専門的な技術や技能を要することが多い。

本報では既往の土砂流出解析モデル²⁾及び砂防堰堤の土砂調節を考慮した河床変動解析モデル⁴⁾を用いて、時間的な土砂流出量の変化を考慮した土砂調節施設効果に



写真-1 小型ドローン空撮機の概要(UAV: Unmanned aerial vehicle)⁵⁾

ついて予測し、考察する。さらに、専門的な知識や技能を有さない担当者や管理者においても容易に飛行が可能な小型ドローン空撮機(写真-1)を有効に活かした山地河川における土砂動態モニタリング手法に関して提案する。

2. 小型ドローン空撮機による山地部での地形把握

近年、ドローンにより空撮された写真を対象に、空間解析モデル^{例えば、6)}(空中三角測量)を用いて、立体的な地形モデルを簡易に構築することが可能となった。そこで、操作性が優れて容易に飛行が可能な小型ドローン空撮機を活用した山地河川における土砂管理モニタリング手法の提案に先立ち、先ず、小型ドローンを用いた地形把握の適用性について考察するため、山地部における急峻で複雑な斜面地形を対象に小型ドローンによる空撮及び空間解析を試行する。

(1) 調査方法

急峻な山地部における斜面地形(ただし、斜面中腹部においては植生や樹木が伐採済)を対象に、小型ドローンによる空撮及び空中三角測量⁶⁾を実施した。撮影条件を表-1に示す。なお、撮影時における地表での風速は約0.5~1.0m/sであった。ドローン空撮により得られた連続空中写真(約10,000m²/枚)を用いて解析し、点群データ、三次元地形図ならびにオルソフォト画像等を作成した。なお、対象地における空撮飛行時間は約10分程度であり、空間解析⁶⁾に要した時間は約30分程度であった。

(2) 調査結果及び考察

小型ドローンにより空撮した写真を用いて、空間解析⁶⁾(空中三角測量)により構築した三次元地形モデルを図-1に示す。なお、空間解析に際して、現地(図-2)における基準点測量(4級程度)等の結果を用いて、調整(補正)する必要がある。各測量地点(P1~P4)の空間制御時における制御誤差を表-2に示す。表-2に示されるとおり、平面的な制御誤差は平均で1~4cm程度であり、鉛直方向における制御誤差は約2cm程度までであった。

上記までに示されるとおり、小型ドローンによる地形把握における精度や適用性(要した時間)等に関する有効性について示した。しかしながら、本事例では写真を用いた空中三角測量による手法を用いているため、未伐採地における植生下部の地表面高については正確に把握出来ておらず、別途、樹木高の補正(差分)が必要となった。近年、樹木下部の地表面も計測可能なレーザ計測機を搭載したドローンが一部で提案されている。ただし、その機体費用は高く汎用性が低いため、レーザ計測機を搭載したドローンの低コスト化及び普及が望まれる。なお、今回使用した小型ドローンは軽量であり、機材の運搬については有効であった。しかしながら、上空における強風の影響を受けて機体が不安定になる可能性が考

られたため、風速に留意しながら飛行させる必要があった。また、今回使用したドローンにも共通するが、一般的なドローンの多くは降雨時の飛行が困難である。そのため、これらのドローンを用いた山地河川での土砂管理

表-1 撮影条件及び空間解析条件

Number of camera stations	57
Flying altitude	~175 m
Coverage area	~0.068 km ²
Pre-calibrated	No
Focal Length	16 mm
Pixel Size	4.89 x 4.89 μ m



図-1 今回構築した三次元の地形モデル



図-2 平面制御における基準点測量の位置

表-2 現地補正における空間制御に関する精度

Label	x-error (m)	y-error (m)	z-error (m)	Error (pix.)
P1	-0.003	-0.002	-0.001	0.393
P2	-0.006	0.041	-0.015	0.383
P3	0.021	0.001	-0.001	0.367
P4	-0.011	-0.0381	0.012	0.364
Average	0.012	0.028	0.010	0.375

における飛行条件としては、日常的な晴天時の巡視点検時や降雨後の緊急点検時における活用が有効であると考えられる。

3. 既往数値解析モデルによる土砂流出予測及び

土砂流出調節施設の効果予測

現在、水系砂防の事業途中において、これまで構築されてきた複数の砂防堰堤の効果等により、既に下流地点での流出土砂量が計画に比べて大幅に低減していると推測されている山地河川を対象に、既往の解析モデルを用いて土砂流出等の時間的な変化や対策施設効果について予測し、考察する。

(1) 解析モデル

降雨等に伴う山地河川からの土砂流出予測に関して、高橋ら⁷⁾によって提案され、原田・里深²⁾によって一部改良された土砂流出予測モデルを用いて、対象流域における洪水及び土砂流出量の時間的な変化を予測する。さらに、砂防堰堤群(複数の砂防堰堤15基: ただし、その内の3基が未整備)の施設効果に関して、里深・水山⁴⁾により提案されている砂防堰堤の施設効果を考慮した一次元河床変動解析モデルを用いて検証する。なお、両モデルの統合による一元的な検討が望まれるが、解析精度及び解析負荷により前者のモデルはKinematic wave法を、後者ではDynamic wave法をそれぞれ採用されており、一般的に両モデルの統合による検討は困難であると考えられる。

そこで、本検討では、簡単のため、既往の土砂流出予測モデル²⁾を用いて洪水及び土砂流出量の時間的な変化を予測し、得られた洪水及び土砂流出量の時間的な変化を用いて、施設効果を考慮した一次元河床変動解析⁴⁾を用いて施設効果を評価する。

土砂流出予測モデル²⁾は、流域を複数の斜面群と一組の河道網とによって表現している。なお、斜面下端における流量及び斜面からの土砂供給量を河道への流入とし、河道部において一次元の河床変動計算を行う(図-3)。基礎式について以降に示す。

斜面部における雨水の流出に関しては、

$$q_0 = \alpha_k h^m \quad (1)$$

$$\alpha_k = \frac{\sin^{1/2} \theta_s}{n_e} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_0}{\partial x} = r_e \quad (3)$$

と表される。ここに、 q_0 : 単位幅流量, θ_s : 斜面勾配, n_e : 等価粗度, h : 水深, r_e : 降雨強度及び係数 m は5/3である。

河道部における流れの抵抗則に関して、山地河川が対

象となるため、急勾配区間から緩勾配区間までにおける流砂形態を考慮している。既往の研究⁸⁾によると、粗粒子が全流動層に分散して流れる(土石流)条件については、 $C_L > 0.4C_{*L}$ とされている。ここで、 C_L は粗粒子の容積濃度、 C_{*L} は堆積層の粗粒子容積濃度である。また、 $C_L < 0.4C_{*L}$ の場合は掃流状集合流動、粗粒子濃度が約0.01以下の場合は掃流砂または浮遊砂として考えられる。それぞれの流砂形態における抵抗則は、

【 $C_L \geq 0.4C_{*L}$ の場合】

$$q = \frac{2}{5d_{mL}} \left\{ \frac{g \cdot C_L + (1 - C_L)\rho_m}{0.02 \sigma} \right\}^{1/2} \cdot \left\{ \left(\frac{C_{*L}}{C_L} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{5/2} \sin^{1/2} \theta_u \quad (4)$$

【 $0.01 < C_L < 0.4C_{*L}$ の場合】

$$q = \frac{0.7\sqrt{g}}{d_{mL}} h^{5/2} \sin^{1/2} \theta_u \quad (5)$$

【 $C_L \leq 0.01$ あるいは $h/d_{mL} \geq 30$ の場合】

$$q = \frac{0.7\sqrt{g}}{n_m} h^{5/3} \sin^{1/2} \theta_u \quad (6)$$

と表される。ここに、 q : 単位幅流量(水+流砂), d_{mL} : 流砂中における粗粒子の平均粒径, g : 重力加速度, ρ_m : 細粒子(細粒礫)を含む液体相の単位体積重量, θ_u : 水面勾配及び n_m : マニングの粗度係数である。なお、河床のモデル化、連続式ならびに粒径別の侵食・堆積速度等については、既往報告⁷⁾を参照されたい。

次に、砂防堰堤の土砂調節効果を考慮した一次元河床変動解析モデル⁴⁾の概要について示す。本解析モデルはスタッガード・スキームを用いて計算しており、流速計算地点(u_i : 図-4)における水深については、風上側(h_i)を用いて計算する。堰堤地点の水深計算に関して、

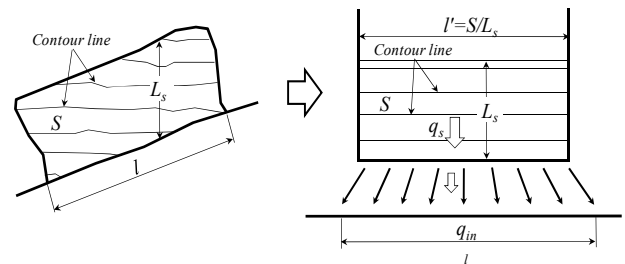


図-3 斜面から河道部への流入流量の算定に関する定義図²⁾

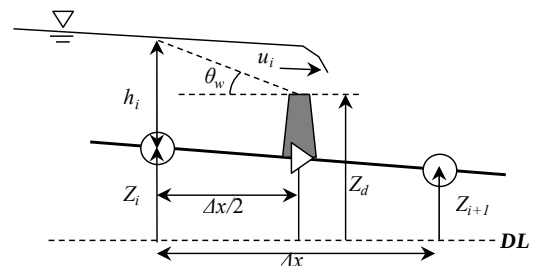


図-4 砂防堰堤地点における変数の配置と水面勾配の設定⁴⁾

堰堤直上流の河床位が堰堤天端高を超えている場合はその水深を堰堤地点の水深とし、堰堤直上流の河床位が堰堤天端高を超えない場合は堰堤直上流の水位と堰堤天端高との差を堰堤地点の水深としている。また、堰堤直上流の水位が堰堤天端高を超えない場合は堰堤地点の水深を最小水深に等しいとし、流速を0と仮定している。なお、詳細については既往文献⁹⁾を参考されたい。

(2) 解析条件

対象流域は、顕著な土砂流出等に伴う下流合流部付近における本川河積阻害による洪水氾濫防止を目的に、水系砂防事業が実施されてきた山地河川（流域面積 $A=7.1\text{km}^2$ ：図-5）とする。なお、解析に必要な地形モデルに関しては、国土地理院により公開されていた航空写真を対象に空間解析⁹⁾により得られた三次元地形データ（図-5）を用いて、流域界、斜面勾配、流域面積ならびに河道長を設定している（図-6）。

解析条件として、これまでの報告等を参考に、 $\sigma = 2,650\text{kg/m}^3$ 、 $\rho = 1,000\text{kg/m}^3$ 、河床の容積濃度 0.65、 $g = 9.8\text{m/s}^2$ 、侵食速度係数を 0.005、堆積速度係数を0.0002、マンニングの粗度係数を $0.003 \sim 0.05\text{m}^{-1/3}\text{s}$ 及び斜面の等価粗度を 1.0 とした。降雨条件については、当初水系砂防計画において採用されている計画土砂流出時の降雨条件を用いた。また、流域、河道、砂防堰堤の位置及び砂防堰堤高を図-6に示す。なお、初期河床厚及び交換層厚については、当初の砂防計画における計画流出総土砂量と

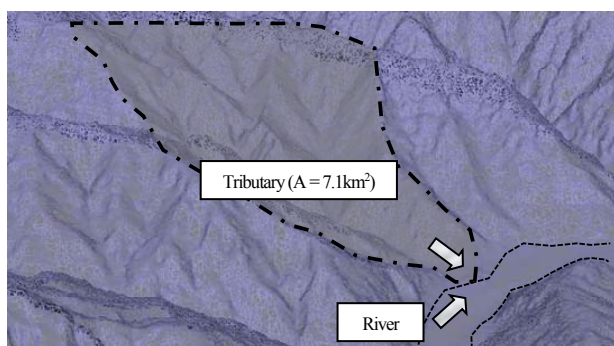


図-5 空中写真を用いて作成した対象流域の三次元地形データ

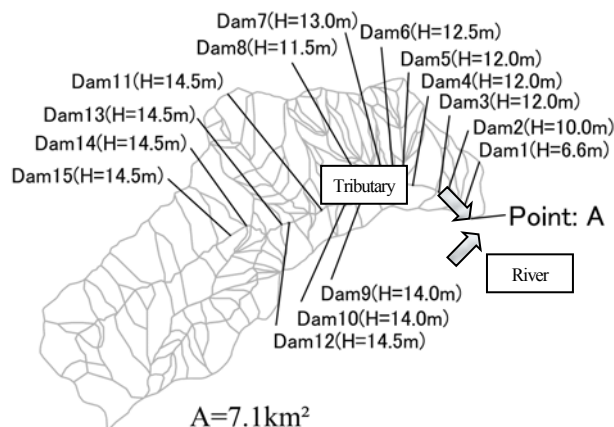


図-6 対象とする流域図及び土砂流出調節施設の位置図

の整合を図るため、試算により推定する。その他の解析パラメータについては、既往研究^{2), 7)}を参考に設定している。

(3) 解析結果及び考察

前述までの解析条件により検討した最下流地点の基準点（A地点：図-6）における洪水及び土砂流出の時間的な変化を図-7にそれぞれ示す。図-7に示されるとおり、洪水ピーク流出量は $Q_{w\max} = 75\text{m}^3/\text{s}$ 、土砂ピーク流出量は $q_{s\max} = 15\text{m}^3/\text{s}$ （その内、粒径 $d=0.02\text{m}$ 以下の流出量は $1.4\text{m}^3/\text{s}$ ：全土砂流出量の約10%）であった。なお、出水前の初期河床厚及び交換層厚⁷⁾をそれぞれ300cm及び50cmとした場合、当初計画における総流出土砂量と解析による総流出土砂量とがほぼ同じ値を示すことが分かった（計画総流出土砂量 $\Sigma q_{sp} = 192,510 \div 191,000\text{m}^3$ ）。

次に、解析結果より得られた洪水や土砂流出の時間的な変化を用いて、砂防堰堤群（将来計画含）の施設効果について評価する。砂防堰堤を下流から順次に配置させた場合の設置基数と下流端における土砂ピーク流出量との関係を図-8に示す。図-8に示されるとおり、12～13基以降（将来計画）の砂防堰堤の施設効果については、ほとんど期待できないものと考えられる。これは、河床変動による時間的な土砂動態の変化を考慮したことにより、砂防堰堤の堆砂域における土砂の堆積及び再侵食に伴う土砂動態の時間的な遅れが施設の土砂調節効果に影響を与えてピーク流出量を低下させたことによるものと、下流域付近で再侵食された細粒分の土砂が堆積せずにそのまま下流に流出（許容流下土砂量）したことによるものと考えられる。また、図-9に示されるとおり、砂防堰堤の設置基数と下流端における土砂のピーク流出土砂濃度との関係については、半数程度の設置基数で顕著に土砂

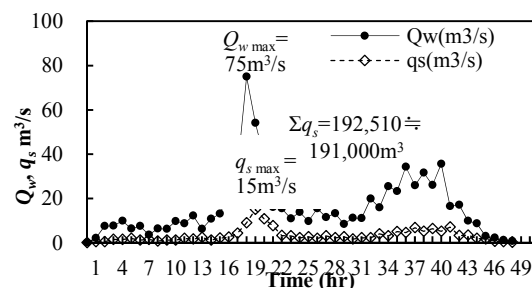


図-7 基準点における洪水及び土砂流出の時間的な変化

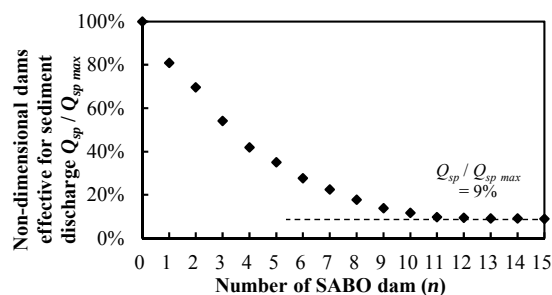


図-8 ダム設置数と最下流域における無次元土砂流出量との関係

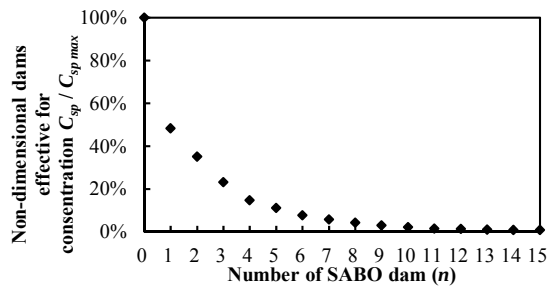


図-9 ダム設置数と最下流域における無次元土砂濃度との関係

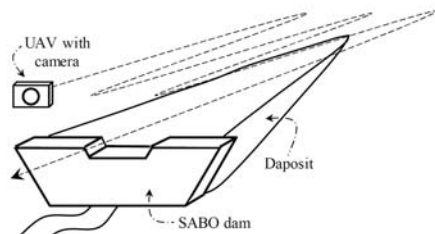


図-10 ドローン空撮機による砂防堰堤の堆砂状況把握手法の概要図

濃度を低下させることが示唆された。今後、パラメータの設定や事業継続に関する詳細な検討が望まれる。

4. 小型ドローンを活用した土砂動態モニタリング

3. において、山地河川を対象に土砂流出量の時間的な変化や対策施設の効果を評価した。ただし、前述に示すとおり、限られた条件における机上での検討であるため、事業の継続や中断等の決定に際しては、更なるモニタリングによる確認が望まれる。そこで、従来の高機能なドローンに比べて簡易に飛行させることが可能な小型ドローン空撮機（2.）を活用した土砂動態モニタリング手法を新たに提案する。河川管理への小型ドローン（例えば、写真-1）の導入により、今後、これまで実施されてこなかった砂防堰堤の堆砂状況や本川合流点部（図-6）における河床堆積状況の定量的な把握について、管理者自らが出水直後に迅速な調査が可能となり、出水直後の土砂動態の基礎情報を得ることが可能となる。以降に、これらの調査手法及び今後の展望を示す。

(1) 砂防堰堤の堆積状況に関する把握手法

近年、流域内に設置された砂防関係施設を対象に、管理者は定期的な点検が求められている⁹⁾。その際、砂防堰堤の本体背面における堆砂状況の違いが土砂調節効果に影響を与えることが考えられるため、その状況について定量的に把握しておく必要がある。しかしながら、堆砂状況の調査に関して、これまで明確な調査手法が示されていない。そこで、カメラを搭載した小型ドローンを活用した堆砂状況（堆砂量、堆砂勾配等）の定量的な把握手法を提案する（図-10）。図-10に示されるとおり、砂防堰堤の前庭部付近からその堆砂域までを対象に小型



図-11 ドローン空撮機による砂防堰堤の堆砂状況把握の一例

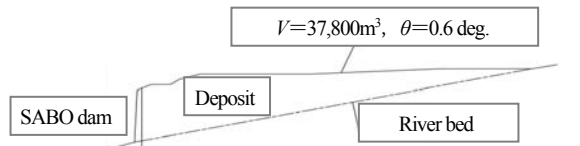


図-12 不透過型砂防堰堤の堆砂状況に関する縦断面図の一例

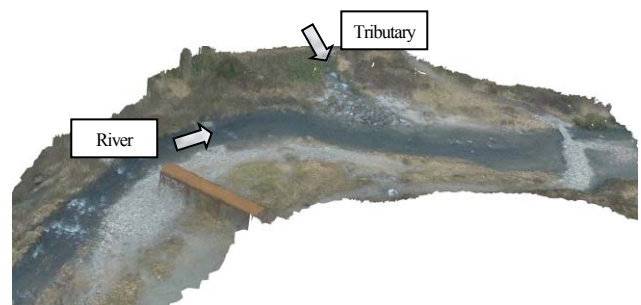


写真-2 合流点部(支川:対象支川)における堆積状況モニタリング

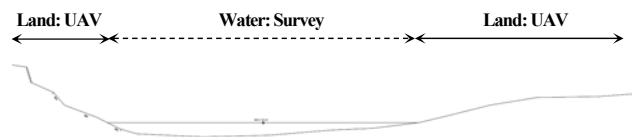


図-13 小型ドローン空撮及び測量結果を併用した河川横断面図

ドローンを用いて空撮し、前述までと同様に三次元地形データを作成する。今回得られた堆砂量 V ($37,800\text{m}^3$) 及び堆砂勾配 θ (0.6 deg.) の結果の一部を図-11及び図-12に示す。なお、堆砂量の算出については、上下流の地形条件より平均化した河床縦断を参考に、それぞれ展開した各河床横断面図において得られる断面あたりの堆砂量を用いて、縦断方向の積分により求めている。

(2) 本川との合流点部における堆積状況の把握手法

検討対象（図-6）の水系砂防事業は、対象流域からの顕著な土砂流出に伴う下流合流部における河床の急激な上昇を防ぐことを目的としており、管理者は出水直後にその合流部の河床堆積状況について把握しておくことが望まれる。その状況把握に際して、定量的な地形把握が容易に可能な小型ドローン空撮の活用が有効であると考えられる。特に、合流部における砂州状況や河道幅やその変化等に関しても詳細な把握が可能である。

下流合流点部を対象に、ドローン空撮及び空間分析により得られた地形状況を写真-2に示す。写真-2に示されるとおり、周辺も含めた合流点部全体の砂州や堆積状況

が視覚的に確認されている。今後、継続的な撮影による経年的な地形変化の分析が望まれる。ただし、一般的に普及しているドローンによる地形把握は、前述までに示す連続する複数の写真を用いた空中三角測量によることが多く、水中部（河床）については把握することが困難であるため、別途、河川横断測量による補完が必要となる。ドローン空撮により得られた地形データと実測結果とを組み合わせた河川横断図を図-13に示す。なお、今後の展望として、近年開発された近赤外レーザ（波長1064nm）と緑レーザ（532nm）を用いたレーザ測深（ALB：Airborne Lidar Bathymetry）¹⁰⁾のドローンへの応用が考えられ、合流点部等における水中部も含めた地形全体の把握が考えられる。ただし、ドローンへの機材の搭載に向けて、レーザ測深機の小型化が必要となるため、今後の計測機の更なる改良が期待される。一方、平成27年12月より施行されたドローン規制法（改正航空法）¹¹⁾における飛行区域が制限され、本対象支川は該当しないが、今後、下流域の市街地におけるドローン飛行に際しては留意が必要である。

本稿では紙面の関係より示さないが、これらの河床変動や砂州形状の時間的な変化に関して、定期的な観測地形データ等を対象に、既往の河床変動解析モデル（河川シミュレーションソフト iRIC¹²⁾）による再現計算、将来の環境変化予測ならびに本川における砂州フラッシュ時に必要な放流量についても検討している。

5. おわりに

本報では、土木分野においても活用が期待されているドローンに関して、専門的な技術や技能を必要としない小型ドローン空撮機を用いたモニタリング手法や、これまで提案されている既往の数値解析モデルを用いた山地河川における土砂管理に関する検討事例を示し、その適用性について考察した。

本研究により得られた成果を以下に要約する。

- 1) 水系砂防事業が継続中である山地河川流域を対象に、時間的な土砂動態の変化等を考慮した土砂流出予測モデルを構築した。
- 2) これにより、これまで基準点付近において議論されてきた総流出土砂量に加えて、新たに洪水及び土砂流出の時間的な変化を予測した。
- 3) そして、得られた洪水及び土砂流出の時間的な変化を用いて、土砂流出調節施設の施設効果を考慮した河床変動解析モデルにより、既往砂防堰堤群及び将来計画における土砂調節効果について評価した。
- 4) 今回得られた結果より、これまで構築された現存する砂防堰堤群（ただし、未整備の砂防堰堤有）により十分に土砂調節効果が発揮され、今後の事業中断（新たな砂防堰堤の増設中断）も有効であると考え

られた。ただし、限られた条件での検討であるため、水系砂防事業の継続や一時中断の決定に際して、モニタリング等による経過観察による確認が望まれる。

- 5) 山地河川における新たな土砂管理モニタリング手法として、専門的な技術や技能を保有しない管理者等においても簡単に操作が可能な小型ドローン空撮機を活用した調査方法について提案した。なお、提案に先立ち、山地部における斜面を対象にドローン空撮による地形測量を実施し、適用性について示した。
- 6) また、小型ドローン空撮機を活用して、これまで実施されてこなかった砂防堰堤の定量的な堆砂状況の調査や下流合流点部での本川河床の堆積状況調査に関する調査方法を提案するとともに、今後の展望について示した。
- 7) なお、現時点において、より操作性が向上した小型ドローン¹³⁾が公表されており、今後更なるドローンの活用が期待される。

参考文献

- 1) 山野井一輝，藤田正治：土砂生産・土砂供給・土砂輸送堆積統合型モデルの開発と山地流域への適用，水工学論文集，Vol. 58, 1_925-1_930, 2014.
- 2) 原田紹臣，里深好文：活発な土砂生産・土砂流出を考慮した洪水予測技術に関する研究，河川技術論文集，Vol. 19, pp.217-222, 2013.
- 3) 水山高久，松岡美和，野中理伸：流砂量の多い状態のハイドロフォンによる流砂計測（音圧データの取得），砂防学会誌，Vol.61, No.1, pp.35-38, 2008.
- 4) 里深好文，水山高久：砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算，砂防学会誌，Vol.58, No.1, pp.14-19, 2005.
- 5) *Dji*, PHANTOM 2, http://www.dji.com/product/phantom-2?_v=1
- 6) Agisoft PhotoScan, <http://www.agisoft.com/>.
- 7) 高橋保，井上素行，中川一，里深好文：山岳流域における土砂流出の予測，水工学論文集，Vol. 44, pp.717-722, 2000.
- 8) 高橋保，中川一：豪雨時における石礫型土石流の予測，新砂防，Vol.44 No.3, pp.12-19, 1996.
- 9) 国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部：砂防関係施設点検要領（案），2014.
- 10) 小野晋三（2012）：新型航空レーザ測量機CZMILの導入，月間測量，2012年7月号，pp12-14
- 11) 国土交通省，無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール，http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html
- 12) iRIC web site, <http://i-ric.org/ja/>
- 13) *Dji*, PHANTOM 4, <http://www.dji.com/product/phantom-4/info>

(2016. 4. 4受付)