

中小河川を対象としたUAV写真測量を用いた 流下能力評価手法に関する研究

STUDY ON EVALUATION METHOD OF DISCHARGE CAPACITY USING UAV PHOTOGRAMMETRY FOR SMALL-SCALE RIVER

齋藤正徳¹・市川健²・天谷香織²・那須野新²

佐藤慶治²・藤崎雅史³・池内幸司⁴・石川雄章⁵

Masanori SAITO, Ken ICHIKAWA, Kaori AMAYA, Arata NASUNO

Keiji SATO, Masafumi FUJISAKI, Koji IKEUCHI and Yusho ISHIKAWA

¹正会員 工博 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

²正会員 工学 株式会社復建技術コンサルタント(〒980-0012 仙台市青葉区錦町1丁目7番25号)

³非会員 仙台市建設局百年の杜推進部河川課 (〒980-8671 仙台市青葉区国分町3-7-1)

⁴正会員 博士 (工学) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻教授(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁵正会員 工博 東京大学情報学環特任教授 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

This study is aimed to develop a method of evaluating discharge capacity easily and inexpensively using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry for a small-scale river. For this purpose, we examined UAV photography methods such as flight route, measurement season and camera direction. In addition, numerical flow analyses from 3-dimensional point clouds built by Structure-from-Motion (SfM) were conducted to verify accuracy.

From the results, it was figured out that ground surface of river channel can be digitally reproduced with high accuracy, in the case where SfM is performed using both vertical and oblique UAV images and UAV photogrammetry is carried out in the winter when vegetation is deciduous. Moreover, in the proposed method of estimating discharge capacity based on UAV photogrammetry, it was figured out that the error of discharge capacity is 7.9 % and the operation time can be reduced to one third, compared with the conventional method of estimating discharge capacity based on the actual measured values obtained from leveling by Total Station.

Key Words : UAV photogrammetry, SfM, discharge capacity, small-scale river

1. はじめに

自治体管理の中小河川において、洪水氾濫が頻発しており、洪水対策や治水安全度の把握のために適切な河川の流下能力の評価が求められている。しかし、自治体の財政的な事情により、流下能力を把握することは全国的に厳しい状況である。

流下能力評価に必要な地表面の標高を把握する手法として、従来の地上横断測量や、Unmanned Aerial Vehicle (以下、UAV) とレーザーを組み合わせたUAVレーザー測量が開発されているが、計測費用が高価である。

それらに対し、UAV搭載カメラで撮影した画像を用い、写真合成により3次元形状を復元する技術 (以下、SfM : Structure from Motion) により地形を把握するUAV写真測量はコスト的に優れている。しかし、植生繁茂下の地表面の標高を捉えにくいという欠点があるため¹⁾、河道形状把握へのUAV写真測量の利活用が限定的となっている。また、UAV-SfMの河川管理への活用に関連する既往研究として、砂防ダム上流の土砂捕捉量の算定²⁾、ハビタット情報の評価³⁾⁴⁾、水域部の河床標高の推

定⁵⁾、河床表層の粒径の平面分布の算定⁶⁾、等多くの事例があるが、植生繁茂下の地表面の標高や樹木繁茂量を推定する研究がない。

以上の課題に対し、国管理河川において、UAV写真撮影方法やSfMから得られた3次元点群の処理方法の工夫により、植生繁茂下の地表面の標高や樹木繁茂量を推定できることが、著者ら現地実証で証明された⁷⁾。

一方、中小河川は、堤防上の樹木が河床をオーバーハングし上空から河道内が見えにくい区間、法勾配が5分の立ち護岸を有する掘り込み区間が存在する等の特徴がある。これらの特徴に対し、従来実施の垂直写真のみの写真合成では、流下能力評価に用いる地表面の標高や樹木情報の取得は困難であると想定される。よって、斜め写真を写真合成に加えるなど、河道の特徴に応じた撮影や3次元点群処理の手法を開発するべきと考える。また、市街地内を流下する場合は、河川に隣接しているビルやマンション等により、安全面の観点からUAV写真撮影のルートや対地高度設定に制約を受ける。

そこで本研究では、中小河川を対象に、与えられた制約において、異なる条件下でUAV写真撮影 (撮影時期、



写真-1 検証サイトの河道状況（著者が撮影）

動画と静止画撮影、垂直写真撮影と斜め写真撮影）を実施した。そして、得られた各画像からSfMにより算出した3次元点群を用い地表面の標高や樹木情報を算出し、水位計算により流下能力を評価した。これらに対し、地上横断測量を用いる従来手法を真値として、流下断面積や流下能力の精度の比較、および技術者に係る作業時間の比較を行った。以上の実証を通じて、流下能力評価用に最適なUAV写真測量手法を開発する。

さらに、地上横断測量から流下能力を評価する方法（以下「従来手法」という。）に対し、本研究が示すUAV写真測量から流下能力を評価する手法（以下「新手法」という。）の利点や、河道管理への活用方策について一考察を述べる。

2. 方法

(1) 検証サイト概要

本研究では、仙台市が管理する梅田川を検証サイトとした。検証の対象は、市街地を流下する延長約1,700mの掘り込み河道の区間とした。川幅は5~10m程度、平均河床勾配は1/100である。河道の状況として、落葉樹のヤナギ等が繁茂しており、写真-1に示すように樹木が堤防をオーバーハングしている区間がある。また、護岸は5分程度の立ち護岸となっている。

(2) UAV写真測量による流下能力評価（新手法）

a) UAV写真撮影

Phantom4 Pro（DJI社製）を用い夏季の2018年6月15日とPhantom4 RTK（DJI社製）を用い冬季の2018年12月13日に、UAVによる写真撮影を行った。撮影は横断方向60m、縦断方向1,730mの範囲を実施した。飛行ルートは図-1に示す流軸に沿って自律飛行を行い、飛行速度約4m/sで実施する動画撮影と飛行速度約2m/sで実施する静止画撮影を実施した。なお、安全面の観点から、飛行ルートは河川区域内とし、対地高度を30m以上確保するように設定している。次に、カメラ向きおよび対地高度は図-2に示す。樹木が堤防をオーバーハングしている状況下においても、地表面を画像として捉えるように、垂直写真に加え対岸から斜め方向の写真撮影を実施した。

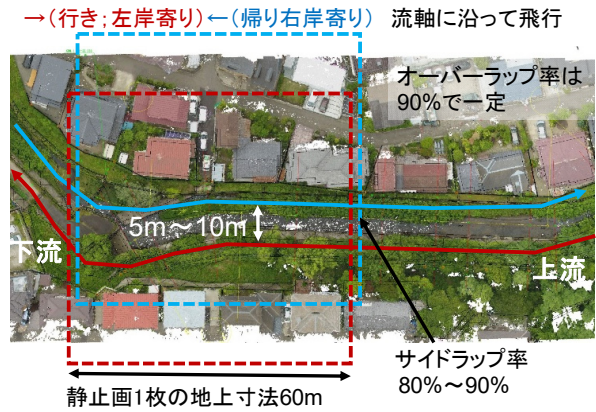


図-1 UAV写真撮影の飛行ルート（平面図）

※下流端付近のみ表示

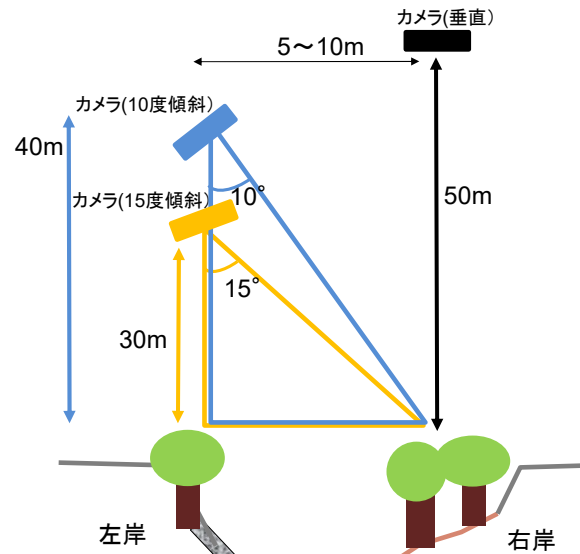


図-2 UAV写真撮影のカメラ向きおよび対地高度（横断図）

また、地上画素寸法が垂直写真と斜め写真とでほぼ同じになるようにそれぞれの対地高度を調整した。これは垂直写真と斜め写真とで地上画素寸法が大きく異なる場合、SfM処理ができないという著者らの経験を踏まえたものである。

b) SfMによる3次元点群発生

UAV写真撮影から得られた2,000万画素の静止画（動画の場合は動画から静止画を切り出すことにより800万画素まで低下）から、撮影時の位置情報、及び写真相互の重複対応関係に基づき、SfM処理により水平方向と鉛直方向の位置情報を持つ3次元点群を作成した。処理には、市販のAgisoft Photoscanを用いた。Photoscanに inputsする解析パラメータは一般的な設定を使用した。3次元点群発生密度は、静止画の場合で約600点/m²、動画から静止画を切り出す場合で約300点/m²であった。

c) 3次元点群から地表面標高および樹木情報を抽出

技術者の手作業により以下の抽出を実施した。まず、UAV静止画像から植生が繁茂している領域と繁茂していない領域とに分類する。繁茂領域は、3次元点群の鉛

直方向の各変動の最低点を示す点群を抽出し、それらの点群から線形補間することや、繁茂していない領域から線形補間することにより地表面の標高を求める。繁茂していない領域は、堤防の端点や最深河床などを捉えている3次元点群を抽出した。これらの抽出された3次元点群により横断面図を作成した。次に、SfMから得られたオルソ画像により把握された樹木繁茂域について、3次元点群の鉛直方向の変動の最高点と最低点の点群の差分値から樹高を推定した。

d) 流下能力評価

水位計算は不等流計算とし、ヤマトソフトプランニング有限会社の「奔流」を用いた。横断面を3分割し計算する準二次元計算により実施した。下流端の水深は限界水深とし、河床の粗度係数は0.03を用いた。計算断面は、事前にUAV写真測量で得られた網羅的な3次元点群情報から把握された川幅が変化している地点や河床勾配が変化している地点を含む任意断面で行う方法を実施した。樹木の取扱いについては、河道計画検討の手引き⁸⁾を参考に、樹木が繁茂している箇所を死水域とし、3次元点群から得られた推定樹高から死水域の高さを設定した。

以上の水位計算を用い、計算流量を $0\text{m}^3/\text{s}$ から $1\text{m}^3/\text{s}$ 刻みで順次増加させ水位縦断面図を求める。そして、各計算断面において堤防護岸天端高を上回る水位を示す計算流量の最小値を、それぞれの計算断面の流下能力値とした。

(3) 地上横断測量による流下能力評価（従来手法）

新手法の作業時間や精度の比較検証用として、従来手法の地上横断測量から水位計算を行うケースを実施した。地上測量は、2018年9月25～10月1日の5日間でトータルステーションを用いて実施した。測線は、事前のUAV写真測量から把握された川幅や河床の変化点を含む34断面とした。また、水位計算用に樹高や樹木の本数について、ポールを用いて計測する現地の樹木調査を別途実施した。流下能力評価は(2)d)に示す方法と同様である。

3. 結果と考察

(1) UAV写真測量と地上測量の地表面標高の比較

UAV写真測量から得られた3次元点群と地上横断測量による地表面の実測標高値との比較を実施した。対象区間において植生が最も繁茂している1000kp付近を比較測線とした。

a) UAV写真撮影の実施時期の比較

UAV写真撮影の実施時期による3次元点群の標高の比較を図-3(c)に示す。夏季に実施したUAV写真測量による3次元点群に対し、冬季の点群の方が地表面の標高を捉える点群が多いことがわかる。これは、図-3(a)(b)に示すUAV垂直写真のとおりに、冬季の方が落葉により地面が写りやすくなり、SfM処理に必要な地表面の特徴点をより多く抽出できたことが要因と考える。

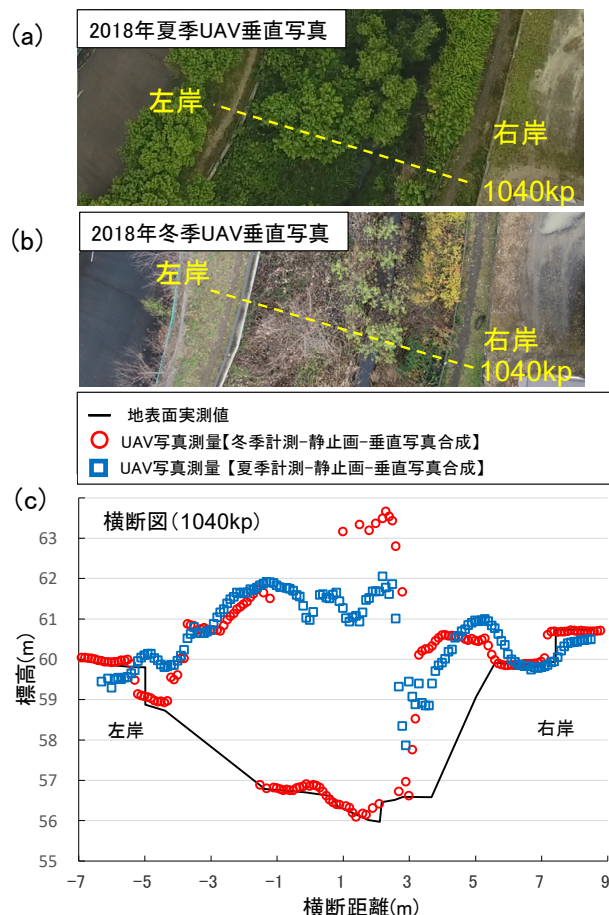


図-3 UAV写真撮影の実施時期の3次元点群の比較 (a：夏季に撮影したUAV垂直写真，b：冬季に撮影したUAV垂直写真，c：1040kp測線の横断面図)

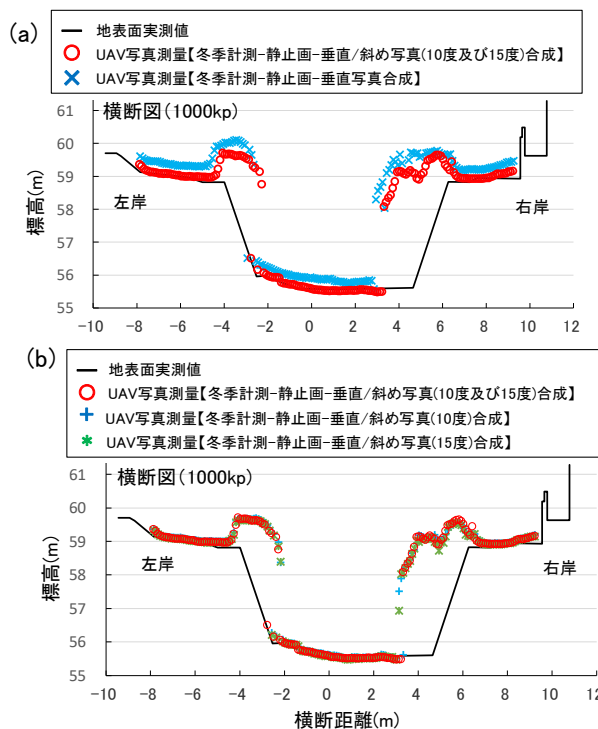


図-4 垂直写真合成と斜め写真合成の3次元点群の比較

(a：垂直写真のみの合成と垂直写真及び斜め写真の合成との差，b：合成に使用する斜め写真の角度による差)

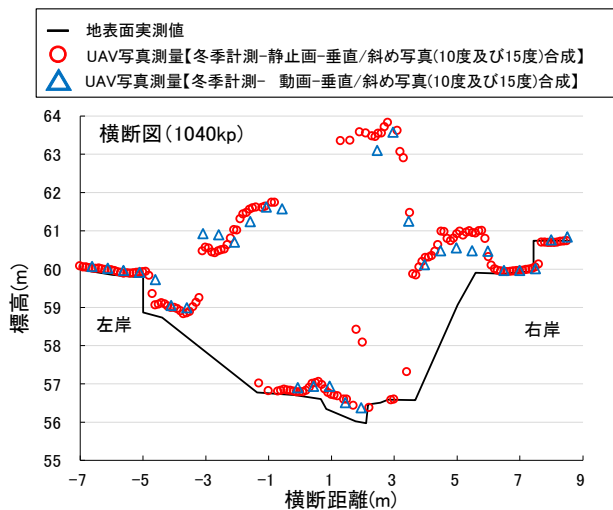


図-5 動画撮影と静止画撮影による3次元点群の比較

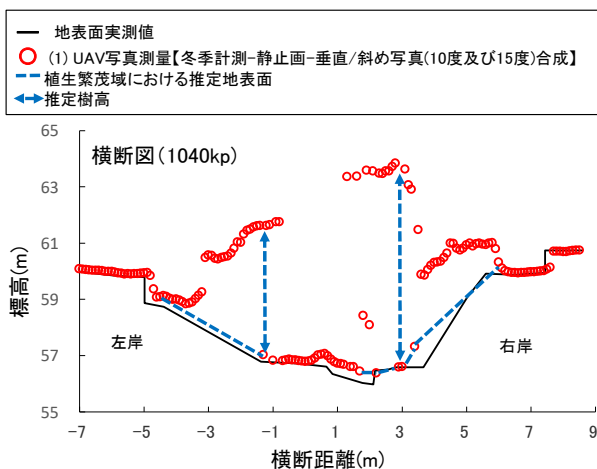


図-6 3次元点群による横断面図作成および樹高の推定

b) 垂直写真合成と斜め写真合成の比較

垂直写真のみの合成と垂直写真及び斜め写真の合成との3次元点群の標高差を図-4(a)に示す。垂直写真のみの合成の場合、鉛直方向に河床高がずれていることが確認される。他の横断面図における実測値との比較結果として、ずれていない場合とずれる場合があり、垂直写真のみの合成は不安定であることが把握された。これは流下能力を左右する河床勾配の値に大きく影響するため、垂直写真及び斜め写真の両方を用い合成することが適切であると考えられる。なお、図-4(b)に示す斜め写真の傾斜角度による3次元点群の標高差は確認されなかった。一方、地表面の標高を捉える3次元点群がない領域が一部確認される。この課題に対し、対地高度をさらに下げカメラをより水平方向に傾けるなどの検討が必要と考える。

c) 動画撮影と静止画撮影の比較

UAV写真撮影方法として、動画撮影と静止画撮影による3次元点群の比較を図-5に示す。動画撮影は、静止画撮影と比較し3次元点群の発生数が少なく、横断距離3m付近の箇所を確認されるように、植生繁茂下の地表面を捉えられない領域が増える傾向となっている。これ

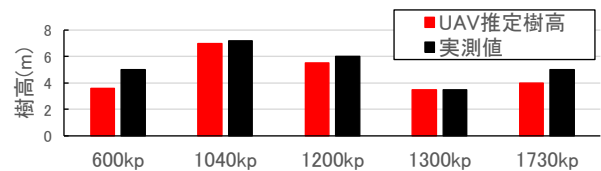


図-7 UAV写真測量による推定樹高と実測値との比較

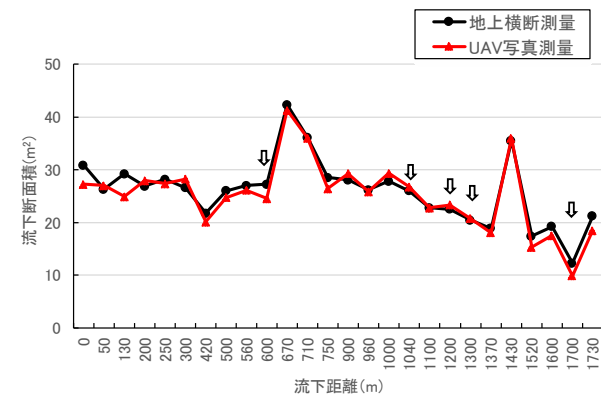


図-8 UAV写真測量と地上横断測量における流下断面面積の比較 (▽：樹木の繁茂により、水位計算時に死水域設定が必要な断面を示す)

は、動画撮影の場合、動画から静止画に編集した画像の解像度が、静止画撮影に対し低下していることが要因の一つと考えられる。

(2) 3次元点群による横断面図作成および樹高の推定

(1)の感度分析から、流下能力評価に必要な地表面標高を把握するためには、画像の解像度が高い静止画撮影を冬季に実施し、SfMには垂直写真と斜め写真の両方を用いる方法が適していることが把握された。よって、水位計算に使用する地表面の横断面図と樹高は、図-6に示す3次元点群を用い、2.(2)c)による方法で地面や樹高を推定した。

a) UAV写真測量から推定した樹高と実測値の比較

樹木が繁茂している5箇所について、冬季のUAV写真測量から得られた3次元点群から推定した樹高と樹木調査による樹高の実測値との比較を図-7に示す。なお、各箇所においてヤナギが繁茂しており、最も高い樹木の樹高を示している。比較結果から、概ね両者は一致しており、UAV写真測量の3次元点群から樹高を推定する方法は有効であることが把握された。

b) UAV写真測量から求めた流下断面面積と実測値の比較

流下能力評価に影響する洪水が流下する断面面積について、UAV写真測量による方法と実測値である地上横断測量による方法とで実施した精度の比較を図-8に示す。地上横断測量を実施した34断面から堰や水門など複雑な構造物が測線にかかっている7断面を除外した27断面で両者を比較した。なお、各横断の流下断面面積は各手法で計測した堤防天端高以下から地表面の標高までの面積としている。UAV写真測量による流下断面面積は実測値に

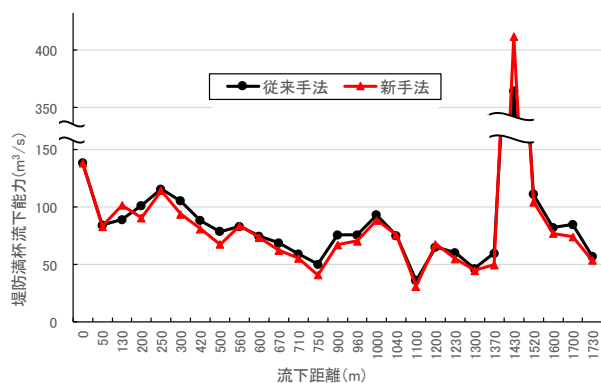


図-9 新手法と従来手法における流下能力の比較
(新手法：UAV写真測量による流下能力評価、
従来手法：地上横断測量による流下能力評価)

対し小さく、若干過小評価の傾向となっている。UAV写真測量による誤差として、UAV写真測量の流下断面積と地上測量との差分値 ΔA を地上測量の流下断面積 A で除した値 $\Delta A/A$ の標準偏差は7.0%であった。

(3) UAV写真測量による流下能力の精度検証

新手法と従来手法による流下能力の比較結果を図-9に示す。なお、計算に用いた断面は(2)b)で示した27断面とした。結果として、新手法は従来手法に対し若干過小評価の傾向となっている。新手法の誤差として、新手法の流下能力と従来手法との差分値 ΔQ を従来手法の流下能力 Q で除した値 $\Delta Q/Q$ の標準偏差は7.9%であった。これは、流量の浮子観測誤差(1割程度以上⁹⁾)より小さい誤差であり、粗度係数の丸め誤差($n=0.021$ と $n=0.02$ の流下能力の差は約5%)と同等の誤差である。

(4) UAV写真測量と地上測量の作業時間比較

UAV写真測量と地上測量について、延長約1,730m区間の実際に要した作業時間を表-1に示す。作業は現地計測の事前準備から流下能力計算に必要な横断面作成や死水域設定までの範囲とした。技術者の作業時間が人件費としてコストに直接影響することから人工を算定している。地上測量の30人工に対しUAV写真測量は11人工であり、約1/3のコストに抑えられている。特に、外業として現地の作業時間が大きく短縮される。UAV写真測量は、雨天時や強風時は実施不可という課題があるが、作業員が河道内に立ち入る必要はなく堤防上から計測できるため、作業員の安全確保の観点からも優れている。一方、横断面作成や死水域設定について、従来手法に対しUAV写真測量は同等の時間を要している。3次元点群の抽出について、抽出する作業をルール化させ、ルールに基づき作業を自動化させることにより、更なる作業時間の短縮が可能と考える。

表-1 UAV写真測量と地上横断測量における作業時間の比較

項目		地上測量	UAV写真測量
現地計測 (外業)	手法	トータルステーションにより 34断面の地上測量	自律飛行により写真撮影
	事前準備	・8時間×2名 現地踏査及び選点作業 ・8時間×2名 GNSSによる基準点設置 【計:4人工】	・4時間×2名 支障物等現場確認 ・8時間×1名 飛行ルートの設定 許可申請等 【計:2人工】
	実施作業	・32時間×4名 縦横断測量 ・8時間×4名 樹木調査 【計:20人工】	・8時間×2名 UAV写真撮影 【計:2人工】
横断面図作成、 死水域設定 (内業)	手法	・現地で得られたデータ(電子野帳)を測量CADに自動読み込み ・技術者が横断面図を作図 ・現地写真および計測データから技術者判断により死水域を設定	・SfMにより点群化し、技術者の手作業により、1)点群変動の最低点を抽出し横断面図を作成、2)点群変動の最高点と最低点の差分値から死水域を設定
	実施作業	・48時間×1名 計算、作図、整理 【計:6人工】	・16時間×1名 SfM点群化、パソコンによる自動解析に要した120時間は含まない ・40時間×1名 点群から横断面図及び死水域設定 【計:7人工】
合計人工		30人工	11人工

(5) UAV写真測量による中小河川の河道管理への活用

以上の中小河川における現地実証から、UAV写真測量による流下能力評価はコスト面と精度面の評価から有効であることが把握された。さらに、従来手法に対して新手法のその他の利点について、計算断面の設定と樹木の設定の観点が考えられる。

まず、局所的な断面変化点や堤防の不連続箇所など流下能力に影響する地点を計算断面に任意に設定できる。従来手法である地上測量は作業量の問題から縦断的に粗な横断データとならざるを得ず、流下能力が小さい区間を取りこぼしてしまう可能性がある。一方、新手法であるUAV写真測量は、SfMから得られる3次元点群により面的に地形データを取得することができ、流下能力評価に影響する局所的な河道の変化を取りこぼさず網羅的に把握することができる。これらの地点を計算断面と設定することにより適切な流下能力評価が実施可能となる。

次に、樹木調査を別途行う必要がなく、3次元点群処理により樹高などを同時に把握し、現地作業を簡素化できる。また、それぞれの樹木繁茂箇所について、樹木ごとに樹高を推定でき、透過係数を用い粗度係数に反映させることも可能である。

以上の検討から、UAV写真測量の流下能力評価への活用の有効性を述べたが、UAV写真測量の処理途中から作成されるデータについて、図-10に示すように副次的に他の河道管理への利活用が考えられる。具体的には、

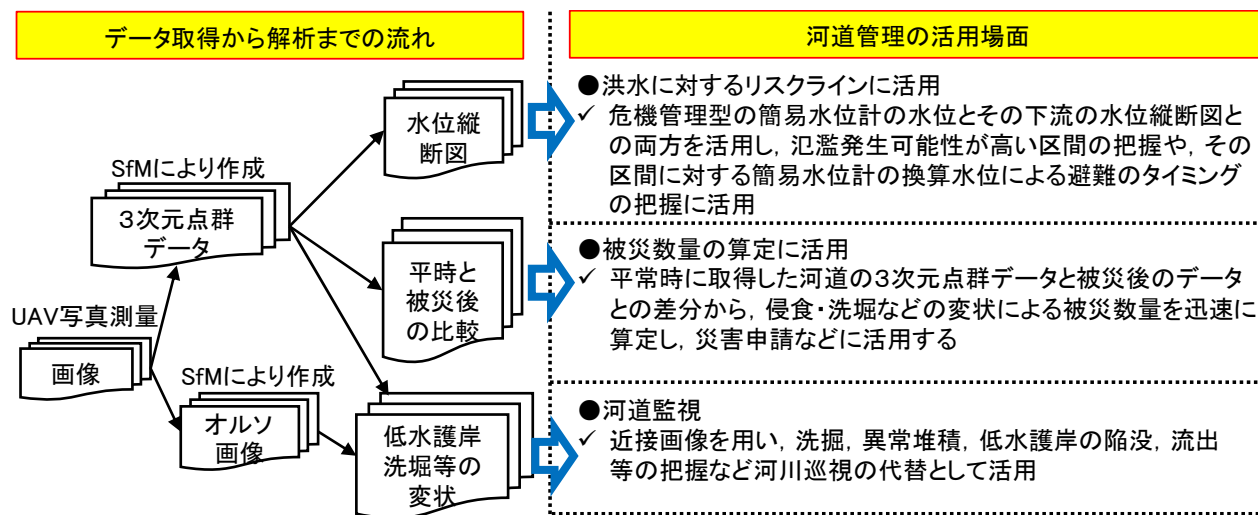


図-10 UAV写真測量における中小河川の河道管理への活用

1) UAV静止画像を用いて、河道の洗堀や異常堆積、護岸の変状の確認など河川巡視の代替として活用することや、
2) 3次元点群を用いて、平常時と被災後の地形の差分データから被災数量を迅速に算定し、災害申請等に活用することが想定される。よって、本研究手法は、流下能力評価のみならず、河道管理へ総合的に活用することで、維持管理コスト削減を図りつつ、中小河川の管理の高度化に寄与できると考える。

4. 結論

本研究では、中小河川を対象に、UAV写真撮影やSfMから算出した3次元点群の加工を様々な条件で現場の実データを用い実証を行い、流下能力評価用に最適なUAV写真測量手法を開発し、簡易かつ安価に流下能力を評価する方法を検討した。得られた成果を以下に示す。

- (1) UAV写真撮影方法として、植生が落葉している冬季に静止画撮影を実施し、垂直と斜め写真の両方を用いSfMを行うケースが流下断面の形状を精度良く再現できる。
- (2) UAV写真測量による流下能力評価は、地上測量による手法と比較して、誤差が7.9%であり、1/3の作業時間で実施できる。

さらに、UAV写真測量は勾配や断面の変化点を網羅的かつ連続的に把握可能であり計算断面を任意に設定することや、3次元点群処理により樹高を簡易に把握できることから、新手法は中小河川における流下能力評価に適していると考えられる。

参考文献

- 1) 齋藤正徳，湧田雄基，唐木正史，市川健，天谷香織，那須野新：UAV写真測量による簡易な河川地形把握手法を活用した河道管理の検討，河川技術論文集，第23巻，pp.179-184，2017。
- 2) 原田紹臣，中谷加奈，里深好文，水山高久：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，河川技術論文集，第22巻，pp.103-108，2016。
- 3) Tamminga, A., Hugenholtz, C., Eaton, B. and Lapointe, M.: Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an unmanned aerial vehicle (UAV): a first assessment in the context of river research and management, *River Research and Applications*, Vol. 31, pp. 379-391, 2015。
- 4) Woodget, A.S., Visser, F., Maddock, I.P. and Carbonneau, P.E.: The accuracy and reliability of traditional surface flow type mapping: is it time for a new method of characterizing physical river habitat?, *River Research and Applications*, Vol. 32, pp. 1902-1914, 2016。
- 5) Shintani, C. and Fonstad, M.A.: Comparing remote-sensing techniques collecting bathymetric data from a gravel-bed river, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.38, pp. 2883-2902, 2017。
- 6) Woodget, A.S and Austrums, A.: Subaerial gravel size measurement using topographic data derived from a UAV-SfM approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 42, pp. 1434-1443, 2017。
- 7) 齋藤正徳，市川健，湧田雄基，天谷香織，那須野新，小田嶋健太，池内幸司，石川雄章：UAV写真測量における多時期計測データを用いた河道管理手法の検討，河川技術論文集，第24巻，pp.257-262，2018。
- 8) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，2002。
- 9) 原田靖生，二瓶泰雄，酒井雄弘，木水啓：浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討，水工学論文集，第51巻，pp.1081-1086，2007。

(2019. 4. 2受付)