

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

STUDY ON THE RIVER CHANNEL MANAGEMENT BASED ON SIMPLIFIED TOPOGRAPHY SURVEY METHOD USING UAV PHOTOGRAMMETRY

齋藤正徳¹・湧田雄基²・唐木正史³・市川健³・天谷香織⁴・那須野新⁴

Masanori SAITO, Yuki WAKUDA, Masashi KARAKI, Ken ICHIKAWA
Kaori AMAYA, Arata NASUNO

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

²正会員 工博 東京大学情報学環特任助教 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

³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)

⁴非会員 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)

River channel discharge capacity is not appropriately evaluated by means of the temporally sparse measuring method because the topographical changes in sandbars and growth rate in riparian forests are substantial. Recently, technology (SfM) that determines three-dimensional topography from UAV images has been employed, but this is limited in use for river channel management owing to the lack of topographic data under vegetation cover and the inadequate validation of the precision of measurements. Accordingly, in this study, the verification and evaluation of the measurement accuracy of topographic elevation data (DSM) derived from UAV-SfM for surface conditions (bare, vegetated, or underwater) and vegetation types were performed to develop a river channel management method by easily estimating channel capacity. Furthermore, we devised a method to facilitate the measurement of ground elevation under vegetation cover, which is important for evaluating discharge capacity, and studied the workflow of channel management using topography and imagery data obtained from SfM. Our study indicated that UAV photogrammetry can be effectively used for sensitivity analysis and for confirming ground deformation in low water channels and declining flow capacity due to topographical changes and tree growth.

Key Words : UAV photogrammetry, SfM, discharge capacity, river channel management

1. はじめに

河川の治水上の機能を確保する目的のために、河道の最新の流下能力を常に把握することは、河川管理において重要な行為である¹⁾。その流下能力算定は、河川定期横断測量、空中写真測量、河床材料調査、植生調査等の結果を用い水位計算を行うことが基本となっており、その他、河積の減少をもたらす河床変動、河積阻害となる樹木群の繁茂状況の把握も河道管理の対象となっている。現在、河川定期横断測量や写真測量は、大河川において5年に1回が基本となっており、樹木繁茂の進行状況は、年1回程度の目視点検により確認することとなっている²⁾。

しかし、上記の点検方法では、地形の経年変化や客観的なデータが把握できず、現況流下能力を適切に評価されない。つまり、河道の低水路内の地形の経年変化は著しく、数年に1回発生する低水路満杯流量程度の出水により、砂州の形状が大きく変化するが、その変化による水位上昇の危険性を定量的に評価せず次期出水期を迎えるという状況になる。また、ヤナギは伐採後約2年で樹高4mに到達した報告³⁾があるなど、河道内の樹木の生長

速度は著しい。高速流が発生する低水路内の砂州の地形の変化や樹林化は、洪水水位の上昇に大きく影響する。さらに、木曽川の事例でも確認されているように、砂州の樹林化は、偏流の発生に起因して深掘れが生じ、洗掘により堤防の治水上の安全性に影響を及ぼす⁴⁾。以上により、変化速度が著しい河道内の状況を最新のデータで客観的に把握することは、治水上の機能を確保するために重要な課題である。

一方、近年においてUnmanned Aerial Vehicle (以下、UAV) を用い、河川調査の取り組み研究が数多く報告されている。例えば、UAV写真測量から、3次元形状を復元する技術 (以下、SfM : Structure from Motion) を用い、河川の横断形状の測定手法の検討⁵⁾、⁶⁾や砂防ダム上流の土砂捕捉量の算定⁷⁾、静止画から洪水前後の砂州上の粒度分布の推定⁸⁾、動画からAerial STIVを用いた河川水の表面流速の計測⁹⁾、赤外線カメラを用い植物の波長の反射度合から植物の活性度を推定する手法の検討¹⁰⁾、等多くの研究が実施されている。特に、UAV写真測量からSfMを用い算定された地形標高の計測精度は、飛行高度やカメラの解像度に左右されるが、計測条件と計測精度

の関係性について、手引きとして詳しく整理されている¹¹⁾。また、SfMの適用範囲として、水中部の河床の標高についても水深2m以浅であれば、ある程度推定可能という報告がある⁶⁾。さらに、SfMから得られた地形表層標高データ（以下、DSM：Digital Surface Model）から平面2次元河川流計算を行い、魚類の生息場評価を実施している研究事例があり、考察として、SfMから得られたDSMは、生息場評価に必要な要求精度を十分に満たしているとの研究報告がある¹²⁾。しかし、レーザー測量においても同様であるが、写真測量では、植生が繁茂している箇所の下地の地表の高さを捉えることはできない、かつ、SfMから得られたDSMは、植生の表層なのか、高さ方向に植生のどの位置を表しているかわからない¹³⁾ことが主要な課題として挙げられる。一方、治水安全度の評価を目的とした河川の流下能力の算定には、植生下の地表面の標高や植生の繁茂量の情報が必須である。経年変化が著しい砂州の地形や植生に関する客観的な情報を収集し、河道管理に対して十分な計測頻度が必要であり、そのためには安価かつ簡便な計測手法が求められている。よって、簡易な流下能力算定・評価による河道管理のために、UAV写真測量から植生下の地表面の標高や植生の繁茂量を推定する方法に関する研究は、社会的意義が大きいと著者らは考えている。

そこで、本研究では、流下能力算定に必要な植生下の地表面の標高や植生の繁茂量を簡易に把握することを目的として、名取川において、UAV写真測量を用いてSfMから得られた地形標高データと現地の実測データとを比較し、地被条件（裸地、植生、水中）や植生の種類ごとの計測精度の検証を実施した結果を報告する。さらに、UAV写真測量結果を活用した治水安全度の簡易な評価手法、河道の維持管理手法に関して一考察を報告する。

2. 方法

(1) 検証サイト概要

本研究では、図-1に示すとおり名取川水系名取川下流部の袋原付近（4kp～6kp）の低水路内を中心に検証サイトとして2箇所選定した。名取川は、多くの河川で課題となっている河道内の樹林化が進んでおり、砂州の地形の経年変化が著しい¹⁴⁾。平成24年に策定された河川整備計画では、選定箇所における河道掘削、樹木管理のための樹木繁茂状況の定期調査が位置付けられている。また、検証サイト付近は、名取川において流下能力が不足している箇所であり、地被条件として、裸地、草本類、木本類が混在しており、UAV写真測量を実施する検証サイトとして適している。なお、検証サイトは、感潮域であり、河床の主要構成材料は砂成分である。

(2) UAV写真撮影

UAVによる写真測量は、平成28年10月7日11時～15時

（1時間の休憩含む）に下流側から上流へ向かって実施した。UAV飛行範囲は図-1に示している。UAVによる河川調査・管理への活用の手引き¹¹⁾を参考に、飛行高度は対地高度60mとし、写真撮影のラップ率は河川横断方向90%、河川縦断方向60%に設定し撮影を行った。UAV機材は、Inspire1（DJI社製）を使用し、搭載カメラの画素数は4,608×3,456（約1,600万画素）、地上の解像度は1.8cm/pixlである。撮影時の天候は晴れであった。風による植生の揺らぎによって、SfMによる写真合成による3次元形状の標高の計測精度に影響を及ぼす可能性があることから、撮影中は、10分間隔で撮影箇所において地上の風速は、デジタル風速計（Kestrel2000）を用いて観測した。

(3) SfMによるDSMの作成

UAV写真から得られた静止画（Aサイトは783枚、Bサイトは1,413枚）から、写真相互の位置関係と3次元地形モデルを解析的に生成し、DSMを作成した。処理には、SfMの代表的な市販ソフトウェアであるAgisoft Photoscanを用いた。Photoscanに入力する解析パラメータは一般的な設定を使用した。作成した3次元地形モデルにおいて、堤防天端や舗装面の端部を標定点（各サイト3点）とし、別途同時期に実施された公共測量である定期横断測量の結果から、公共座標のDSMを作成した。水中部については、UAV写真から作成したDSMが、水の屈折の影響で実際の水深より浅く評価されることから^{5), 6)}、近傍の袋原水位観測所（図-1参照）の水位データから水面の位置を特定し、水深に水の屈折率（1.33）を乗じた。

(4) DSMと実測河川地形との比較による精度検証

精度検証の概略イメージを図-2に示す。UAV-SfMにより得られたDSMの精度検証を実施するために、同時期に実施された地表面標高（以下、DEM：Digital Elevation Model）を計測した定期横断測量を正解データとし、A



図-1 検証サイト

（名取川4kp～6kp付近の航空写真を示している。航空写真の撮影は平成24年に実施。）

サイトは4.6kp, 4.8kp, 5.0kpの3測線, Bサイトは5.6kp, 5.8kpの2測線で比較検証を実施した。なお、植生部については、ポールを用いて植生の最高部1点計測により、植生高の実測値を取得し、UAV-SfMにより得られたDSMと定期横断測量との差分と実測植生高とを比較することにより精度検証を行った。

3. 結果

UAV-SfMにより得られたDSMの精度検証を行うために、定期横断測量と標高の比較を実施した。5測線における河川横断面図を図-3に示す。各横断面図に、UAV-SfMにより得られたDSM, 地表面実測値として定期横断測量結果, 植生表層実測値, 水面高を重ね合わせている。また、UAV写真や現地での目視により判別し

た植生区分を横断方向に示している。地被条件として、水域、裸地、草地、樹林の区域が混在している状況であった。裸地については、UAV-SfMと地表面実測値がよく一致しており、水域部については、測線5.6kpの左岸側の水衝部、5.8kp及び4.6kpでUAV-SfMがやや浅く評価された。植生部については、UAV-SfMが植生表層実測値より低い値を示しており実際の植生の背丈より低く評価されていた。

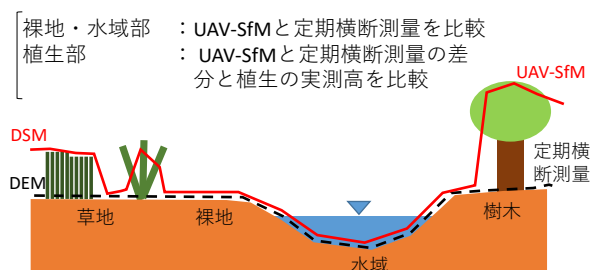


図-2 精度検証の概略イメージ

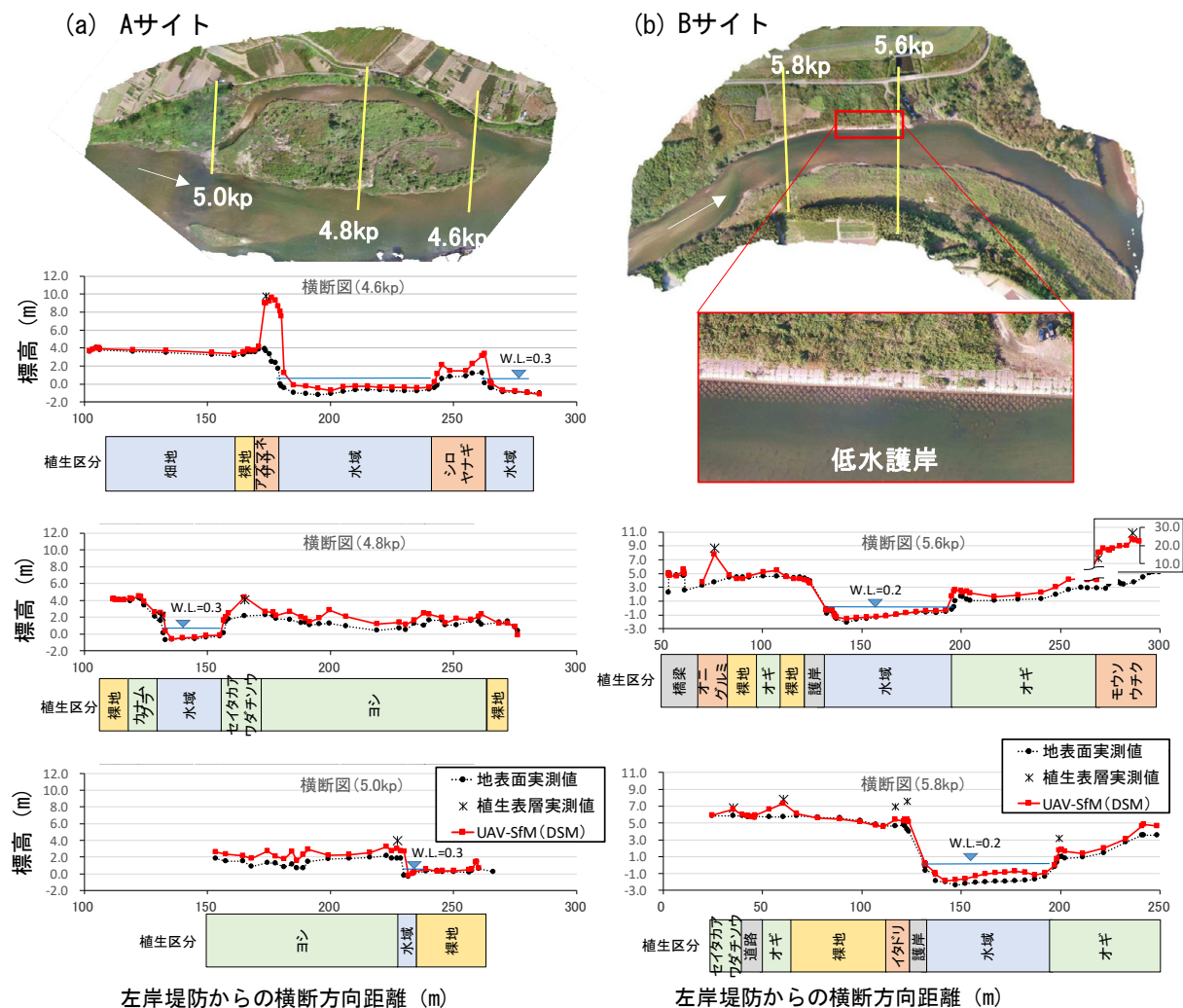


図-3 各サイトにおける各測線の断面形状

(定期横断測量結果を地表面実測値とし、定期横断測量の標高値に、ポールにより植生最高部1点計測し得られた植生背丈を加えた値を植生表層実測値とした。なお、各地点の標高値と植生区分との横断位置は対応する。)

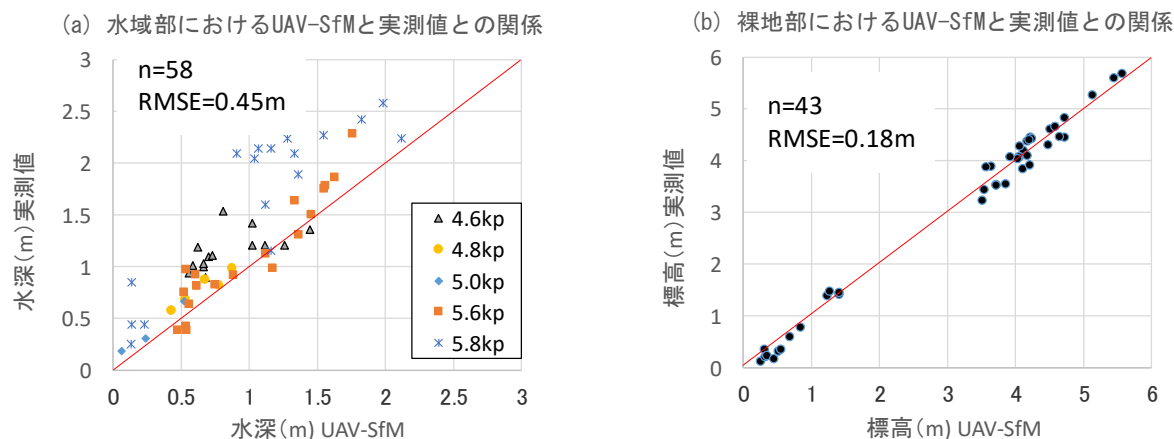


図-4 UAV-SfMにより得られたDSMの点群と地表面実測値との標高の相関関係
(定期横断測量結果を地表面実測値としている。n:地点数, RMSE: UAV-SfMと実測値との差分の鉛直方向の標高差の平均二乗誤差。)

なお, UAV写真撮影時間帯の地上風速の計測値は, 0~4m/sの範囲内であり, 4m/sを示した瞬間は植生の枝葉が揺らいでいたことが目視で確認された。次に, 図-3(b)にDSM作成過程で生成された低水護岸付近のオルソ画像を示す。水中部の根固めブロックの様子も画像から把握できる。

裸地部及び水域部において, UAV-SfMにより得られたDSMの点群と地表面実測値との標高の相関関係を図-4に示す。各点が1:1の直線に近いほどDSMの精度が高いことを表している。裸地部については, UAV-SfMと実測値との差分の標高の平均二乗誤差(RMSE)は0.18mであった。水域部については, 水深のRMSEは0.45cmであり, 全体的に実測水深よりUAV-SfMが浅めに計測される傾向であることが分かる。なお, 近傍の名取川水質観測所(図-1参照)の平成28年10月5日の透視度は約1.0mであった。

植生域において, 植生の群落ごとのUAV-SfMにより得られたDSMの計測精度を表-1に示す。DSMは必ずしも植生の表層を捉えているものではなく, 植生の繁茂形態に応じて, 表層, 中層, 下層の高さを捉えていることが把握された。つまり, 上層に隙間が多い群落はより下層の位置を捉えていることになる。群落として, アズマネザサ, セイタカアワダチソウ, カナムグラ, モウソウチク, オニグルミは, 表層をDSMが捉え植生の背丈の8~10割の高さを示した。ヨシ, オギは, 中層をDSMが捉え植生の背丈の6~7割の高さを示した。イタドリは, 下層をDSMが捉え植生の背丈の3割の高さを示した。なお, 各繁茂タイプのDSMの位置イメージを図-5に示す。

4. 考察

(1) UAV-SfMの地被条件における精度検証

名取川におけるUAV写真測量からSfMを用いて算出し

表-1 各群落におけるUAV-SfMから得られた植生高と実測値との比較

群落名	UAV-SfM値 (a) ^{※1}	実測値 (b) ^{※2}	a/b ^{※3}	検証 地点 数	繁茂類型
アズマネザサ	5.6m	6.1m	0.9	n= 1	密集型
ヨシ	1.3m	2.2m	0.6	n= 1	中間型
セイタカアワダチソウ	0.7~2.0m	0.9~2.3m	1.0	n= 2	密集型
カナムグラ	1.0m	0.6m	1.7	n= 1	密集型
オギ	1.3~1.6m	2.1~2.2m	0.7	n= 2	中間型
イタドリ	0.5~1.2m	2.3~3.3m	0.3	n= 2	拡散型
モウソウチク	13~18m	10~22m	1.0	n= 2	密集型
オニグルミ	4.0m	5.0m	0.8	n= 1	密集型

※1 UAV-SfMから得られたDSMと定期横断測量結果の差分により算出

※2 ボールを用い地表面から植生の枝葉の最頂部までの高さを現地計測

※3 (a)の群落ごとの平均値を(b)の群落ごとの平均値で除した。

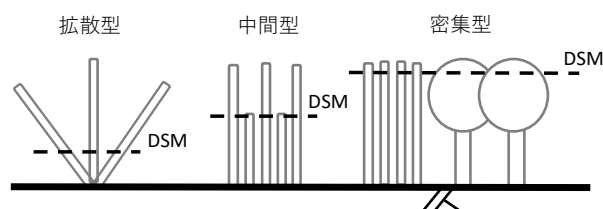


図-5 各繁茂タイプのDSMの位置イメージ
(植生形状は単純化している)

たDSMについて, 地被条件に応じて計測の傾向が把握された。従来手法である定期横断測量に要求されている計測精度は $\pm 0.15\text{m}$ ¹⁵⁾であることを鑑みると, 図-4に示すとおり, 裸地部は良好な結果である一方, 水域部では計測精度が不十分であった。既往研究として, 長良中流部でのUAV-SfMから得られた水域部の計測水深の精度は2m程度までは精度良く河床形状が把握されたという報告⁶⁾があるが, 本研究では, 水深が2mより浅い地点において

も河床形状が実測よりも浅めに評価された。その要因として、本サイトが感潮域であり透視度が既往研究と比較して低いことが考えられ、水中可視化⁹⁾等の処理による改善が必要であることが示唆された。

次に、表-1及び図-5に示す植生における群落ごとのDSMの評価結果から、群落の繁茂形態によって異なる傾向があることが把握された。UAV-SfMから得られたDSMは一律に植生の表層を捉えるものではなく、繁茂している表層の位置に大きな空隙がある場合は、より下層の位置を捉えることになる。本研究の実証結果は、ある特定の時期や気象条件下での計測結果であり、地点数が十分でなく、最終結果を導き出すには、更なる現場実証により計測データを蓄積することが必要と著者らは考えている。すなわち、計測時の風の影響や季節変化による違いを検証し、DSMの群落ごとの特性を導き出し、植生の群落ごとUAV-SfMの植生高評価値を定量化する必要がある。一方、本研究はデータ数が不十分であるが、考え方の方向性としては十分に社会的意義がある。つまり、群落ごとにDSMの植生高の定量的なデータが蓄積されれば、例えば、新たに計測したDSMから、群落ごとのUAV-SfMの植生高評価値の過去の蓄積データの平均値を差し引くことで、DSMから流下能力算定に必要な植生下のDEMを推定することが可能となる。現況治水安全度の評価のための流下能力算定に必要な地表面の平均河床高や樹木繁茂量を、UAV写真測量という簡易かつ安価な手法により推定することができると考えられる。

(2) UAV写真測量を活用した河道管理手法

UAV-SfMから生成される地形データや画像データを活用した河道管理のワークフローの検討についての一考察を以下に示す。

まず、流下能力算定のために実施されている従来手法の定期横断測量や樹木調査は、経年変化が著しい砂州の再堆積や樹林化の把握には対応できないことは上記に述べたが、これらの課題に対応するために計測頻度を密にすることはコスト・手間の観点から最善策ではない。しかし、従来手法の外業作業時間が2日程度に対し、本研究のUAV写真測量では、図-1の計測範囲であればわずか3時間程度で実施可能であり、レーザ測量よりコスト面では優位である¹³⁾ことから、頻度多く計測する手法としては適している。

ここで、本研究で提案するUAV写真測量からDEMを推定し流下能力を算定するワークフローを図-6に示す。全区間を一律に計測することではなく、洪水に対して水位が上昇しやすい区間や河道掘削実施区間において、例えば出水期前の年1回程度実施することを本研究では提案する。図-6のワークフローの工程の一つとして、DSMからDEMを推定する際に、異なる時期や気象条件下での複数回計測による蓄積された群落ごとの平均植生

高のSfM評価値を用いているが、全国的に課題となっているヤナギやハリエンジュ等の成長が著しい群落の成長速度³⁾を考慮し評価することも考えられる。

以上は、UAV写真測量から流下能力算定の活用手法であるが、その他、河道管理の様々な場面において、UAV写真測量から得られる地形データや画像データの活用方法が考えられる。その概要を図-7に示す。まず、DSMの作成過程の副産物として生成されるオルソ画像(本報告の地上解像度1.8cm/pixl)は、飛行高度60mで護岸のひび割れを検出できる解像度はないが¹¹⁾、植生の判別

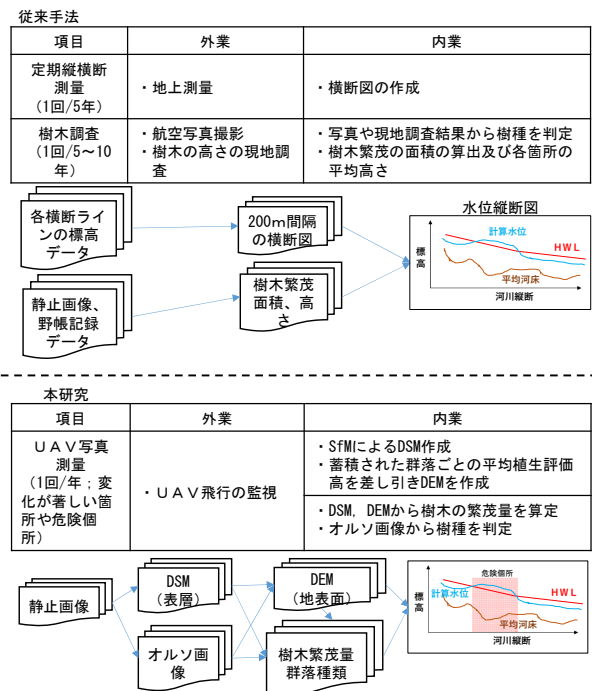


図-6 UAV写真測量から流下能力を算定するフロー

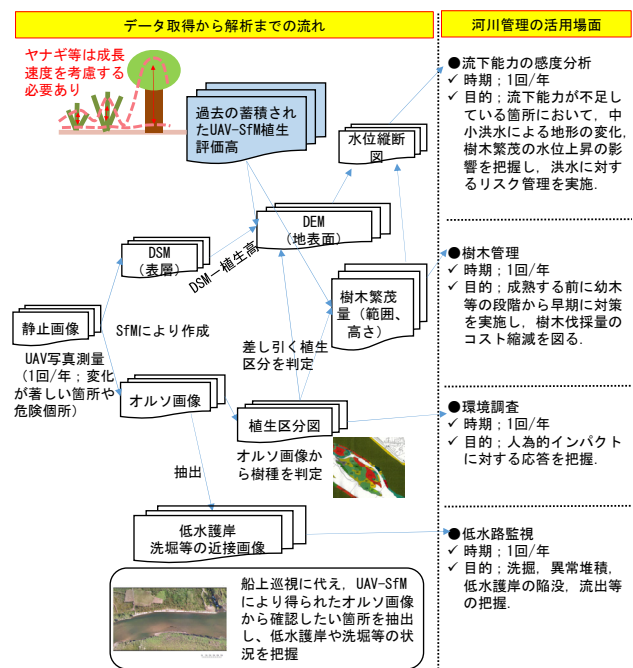


図-7 UAV写真測量から得られるデータの河道管理への活用

や図-3に示すように低水護岸や根固めブロックが陥没・流出していないか等の把握に使用可能である。よって、従来の出水期前の年1回実施されることが一般的な船上巡視の代替としての利用可能性が高いと考えられる。さらに、年1回の計測を簡易に行う本研究の手法は、河道掘削後の土砂再堆積のモニタリングや樹木の再繁茂の抑制を目的とした樹木管理に大いに利用できる。樹木が再繁茂しにくい河道掘削の掘削高の現場実証研究⁶⁾や、樹木が成長する前の段階で幼木の伐根や草地をブルドーザーで踏み倒すことによるトータルコストの削減の現地実験¹⁷⁾、河道掘削等の人為的インパクト・レスポンスの把握等全国的に様々な取組が実施されており、これらの研究開発に必要な経年変化の把握のために、本研究の手法は大いに貢献できると考えている。

5. おわりに

本研究では、流下能力算定に必要な植生下の地表面の標高や植生の繁茂量を簡易に把握することを目的として、名取川においてUAV-SfMの現地実証を行った。UAV-SfMから作成したDSMについて6測線の精度検証結果として、得られた成果を以下に示す。

- (1) 地表面が裸地の場合、標高の計測誤差は、RMSE=0.18cmであり地形測量に求められる要求精度を概ね満たしていた。
- (2) 水域部では、標高の計測誤差は、RMSE=0.45cmであり、実測より浅く評価されていた。
- (3) 植生については、必ずしも植生の表層をDSMが捉えているものではなく、植生の繁茂形態に応じて、表層、中層、下層の高さを捉えていることが把握された。

さらに、UAV写真測量から簡易に地表面の標高であるDEMを推定する方法、流下能力の算定フローの提案を行った。UAV写真測量から得られる地形データや画像データの河道管理への利活用は大いに有効であることが把握された。

今後は、更なる現場実証により計測データを蓄積し、群落ごとのDSM値の定量的な評価の実施、簡易かつ安価な河道管理及びモニタリング手法の枠組みの検討を行っていく。

謝辞：国土交通省東北地方整備局仙山河川国道事務所に名取川における各種資料の提供及び現地計測にご協力いただいた。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検要領, 2012.

- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：国土交通省河川砂防技術基準維持管理編（河川編）, 2015.
- 3) 佐貫方城, 大石哲也, 三輪準二：全国一級河川における河道内樹林化と樹木管理の現状に関する考察, 河川技術論文集, 第16巻, pp.241-246, 2010.
- 4) 齋藤正徳, 古賀博久, 高橋伸次, 稲葉傑, 浅野和広, 黒田直樹, 柳瀬伸一, 西澤諒亮：木曽川における大規模深掘れの発生要因の分析, 河川技術論文集, 第20巻, pp.259-264, 2014.
- 5) 渡辺豊, 河原能久：UAVを利用した空中写真の河川地形計測への適用性, 土木学会論文誌B1（水工学）, Vol.72, No.4, pp.I_1105-I_1110, 2016.
- 6) 原田守啓, 荒川貴都, 大井照隆, 鈴木英夫, 沢田和秀：UAVと水域可視化処理による河川地形計測手法の検討, 河川技術論文集, 第22巻, pp.67-72, 2016.
- 7) 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.
- 8) 寺田康人, 藤田一郎, 浅見佳世, 渡辺豊：UAVによる撮影画像を用いた洪水前後の砂州上粒度分布の計測, 土木学会論文誌B1（水工学）, Vol.71, No.4, pp.I_829-I_834, 2015.
- 9) 藤田一郎, 能登谷祐一, 霜野充：マルチコプターから撮影されたブレ動画の高精度補正に基づくAerial STIVの開発, 土木学会論文誌B1（水工学）, Vol.71, No.4, pp.I_919-I_924, 2015.
- 10) 長井正彦, 柴崎亮介, アーメッドアフザル：無人ヘリコプターによる河川環境モニタリング手法の開発, 水文・水資源学会誌, Vol.22, No.5, pp.401-408, 2009.
- 11) 国土交通省東北地方整備局東北技術事務所：UAVによる河川調査・管理への活用の手引き（案）, 2016.
- 12) 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.
- 13) 佐貫方城, 渡辺敏, 宮田真考, 草加大輝：3種の航空測量技術を使用した河道地形の効率的測量的実装展開に向けた比較検討, 河川技術論文集, 第21巻, pp.105-110, 2015.
- 14) 国土交通省東北地方整備局：名取川水系河川整備計画〔大臣管理区間〕, 2012.
- 15) 財団法人日本建設情報総合センター：河川定期横断測量業務実施要領・同解説, 1997.
- 16) 大石哲也, 萱場祐一：河川敷切り下げに伴う初期条件の違いが植生変化に及ぼす影響に関する一考察, 環境システム研究論文発表会論文集, Vol. 41, pp.351-356, 2013.
- 17) 川崎智仁：河川の維持管理における中村河川国道事務所の取り組みについて, 四国地方整備局管内技術・業務研究発表会, 2016.

(2017. 4. 3受付)