

UAVと水域可視化処理による 河川地形計測手法の検討

DEVELOPMENT OF BED TOPOGRAPHY SURVEY TECHNIQUE BY
UNDERWATER IMAGING PROCESS FOR UAV PHOTOGRAMMETRY

原田守啓¹・荒川貴都²・大井照隆³・鈴木英夫⁴・沢田和秀⁵

Morihiro HARADA, Takato ARAKAWA, Terutaka OOI, Hideo Suzuki and Kazuhide SAWADA

¹正会員 博(工) 岐阜大学 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

²学生会員 岐阜大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³正会員 大日コンサルタント株式会社 調査事業部 (〒500-8384 岐阜県岐阜市藪田南3-1-21)

⁴非会員 朝日航洋株式会社 防災コンサルタント部 (〒350-1165 埼玉県川越市南台3-1-1)

⁵正会員 博(工) 岐阜大学 工学部付属インフラマネジメント技術研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

Three-dimensional topographic UAV photo survey (UAV photogrammetry) is being utilized in public works owing to the spread of inexpensive and highly efficient UAV and powerful photogrammetry software. In this paper, we intend to examine the effectiveness of UAV photogrammetry on the river bed topography survey and bed material measurement. A field observation was conducted in the middle stream of Nagara river. The observed reach has cobble-gravel bar of a large area and wide range of water depth. To verify the accuracy of underwater topography measurement by UAV photogrammetry, actual bathymetry was measured using ADCP. Moreover, the measurement accuracy when using the underwater imaging process was compared to that when using the original process. UAV photogrammetry with the imaging process can reach greater depths of the underwater riverbed; however, the reflection of the water surface and turbidity block it considerably. 1.33 times (the refractive index of water) of water depth from UAV photogrammetry was in agreement with the actual bathymetry from ADCP measurement. These results demonstrate the required knowledge for employing UAV photogrammetry on the river.

Key Words : UAV photogrammetry, underwater imaging, river bed topography, grain size distribution

1. はじめに

河道内の地形を把握することは河川管理の基本の一つであり、そのための手法として、定期縦横断測量が永らく実施されてきた。近年になって、航空機レーザ測量やラジコンヘリ、電動小型UAV(以下、UAV)を用いた写真地形計測等の新しい地形計測技術が急速に発展してきており、国土管理の様々な場面で活用されるようになりつつある。また、これらの光学的手法は、地形を面的に把握できるという点で、定期縦横断測量に対する大きなアドバンテージが存在するが、河川空間には、水が流れ、植物が繁茂するなど、光学的観測の障害となる要素も多く存在する。そのため、最新の河川砂防技術基準調査編においても、樹林、水面下の形状の把握について、今後より一層の技術開発が必要と位置づけている¹⁾。

水中での減衰が少ないグリーンレーザーを用いることによって水中の地形を計測するALB(Airborne Laser

Bathymetry)も機材の改良が進みつつあるが、水中計測可能な飛行高度に制約があり、中村ら²⁾が、わが国の1級河川直轄区間を対象として検討した結果、ALB計測飛行が不可能な区間も多いことが既に分かっている。

佐貫ら³⁾は、航空機レーザ測量、ヘリ・レーザ測量、UAVによる写真地形計測を、中小河川の河川地形計測に適用し、空間スケール別のトータルコストを比較して、各手法の適用範囲を例示している。リーチスケールを対象とした調査では、UAVのコストがもっとも低く、低高度で撮影された高解像度の写真情報の活用可能性についても触れている。

近年急速に普及しつつあるUAVと、異なる方向から撮影した複数の写真をもとにカメラと対象物の3次元構造を復元するSfM(Structure from Motion)技術を実装したソフトウェアとを組み合わせることによって、3次元地形を計測する手法は、地上部については約10cm以下の測量精度⁴⁾を確保することが可能である一方、礫床河川

の地形測量に適用した事例⁵⁾⁶⁾では、やはり、水中部の測量精度が課題となっている。

河川管理の現場では、河川地形測量のみならず、災害発生時の被災状況把握、河川環境モニタリングといった河川管理における多様なニーズに応えることができる現地調査手法が望まれている。そこで、本研究は、柔軟な運用が可能なUAVによる写真地形計測の適用範囲を水中部に拡大することにより、河川管理に資する付加価値の高い調査手法を提供することを目的とし、セグメント1（扇状地）区間における現地調査と、画像処理による水中可視化による水中地形計測精度の向上について検討した。さらに、UAV空撮により得られた高精細な画像に基づき、河床表層材料の粒度分布推定を行う上での手順の定式化について検討した。

2. 方法

(1) 現地調査

a) 検証サイトの選定

本研究の対象として、木曾川水系長良川島田地区(48～49kp)を選定した(図-1)。当地は、長良川扇状地の中ほどに位置している。湾曲した河道の外岸(左岸側)に複数の根固め水制が設置されており、水制周辺が洗掘を受けているなどして、水深分布の幅が広い。また、湾曲部内岸(右岸側)に幅広い粒径の河床材料に構成された広い砂州が存在する。また、交通のアクセスが良いこと、航空法による無人航空機の飛行が可能なエリアであることなど、本研究が試行する技術の検証に適した条件を備えていることから、検証サイトに選定した。

b) UAV空中写真撮影

UAVによる空中写真撮影は、水位の条件が異なる2回実施した。第1回は、出水後の増水が収まっておらずやや水位が高かった平成27年7月21日、第2回は概ね平水位であった8月7日に実施した。直近の忠節水位観測所において、7月21日の水位は、平水位+0.5m程度、8月7日は平水位-0.2m程度であった。

UAV機材はα UAV (amuse-oneseft社製)を使用し、搭載カメラの画素数は4,592×3,448(約1,600万画素)、撮像素子サイズは17.3×13.0mm、焦点距離は14mmである。



図-1 検証サイト(長良川48～49kp, H27. 8. 7撮影)

飛行高度は対地高度150mとし、撮影写真のラップ率60%以上にて撮影を行った。なお、後に述べる河床材料調査手法としての活用を検討するため、一部範囲については、飛行高度50m、100mでの撮影も実施した。また、検証サイト内に、空中写真撮影のために12点の標定点を設置し、VRS測量により公共座標を取得した。

c) ADCPによる地形計測

検証サイトにおいて、水中河床形状の検証データを取得するため、エンジン付きボートとADCP超音波流速計M9(Sontek社製)によって面的な河床形状を取得した。調査は、平成27年8月7日に実施した。

ボートによる計測は、検証サイトの滞筋を縦断方向に往復しながら、横断方向約5m間隔で河床高を取得した。ADCPが直接的に計測するのはADCPから河床面までの距離(水深)であるが、RTK-GPSにより同時取得したADCP本体の3次元座標から、間接的に河床面の標高を取得することができる。ADCPにより取得した面的な河床高の点群を元に、河床形状のDEMデータを作成した。

d) 河床材料調査

検証サイト右岸側の固定砂州の複数地点において、河床材料調査を実施した。調査は面積格子法により行い、1m方形枠に20cmピッチのコドラートを用いて1地点あたり36サンプルの長径・中径・短径を記録した。現地調査は、平成27年7月下旬に実施した。

(2) UAV-SfMソフトによるDEMモデルの生成と精度検証

a) 水中部の可視化を目的とした画像処理の概要

空中写真画像の水中部分は、一般的にはコントラストが低く、陸上と比べると水面下の地形を視認することは困難である。SfMによる写真地形計測は、複数の写真に写りこんでいる特徴点を抽出して、写真相互の位置関係を割り出すことから、水面下の地形のテクスチャを画像処理により浮かび上がらせることにより、写真地形計測精度の向上が見込まれる。

本研究では、水面下の地形のテクスチャを浮かび上がらせることを目的に、デジタルカメラ撮影された画像データが保有する高ダイナミックレンジのコントラストを引き伸ばす処理⁷⁾を、2回分のUAV空撮写真に対して、それぞれ行った。著者の一人である鈴木ら⁷⁾は、同様の処理を河川の空中写真に試行し、画像処理によってSfMソフトウェアが自動抽出する特徴点が増加することを確認しており、水中部の地形計測精度の向上が見込まれる。

b) SfMソフトウェアによるDEMの生成

UAV空撮写真を元に、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、DEMデータを取得する。これら処理には、SfMベースの代表的な市販ソフトウェアの一つであるAgisoft Photoscanを用いた。Photoscanに入力する解析パラメータは概ね一般的な設定を使用し、生成された3次元地形モデルに、VRS測量した標定点の座標を与えて、公共座標のDEMデータを出力した。2回

分の空撮写真，画像処理の有無によって，計4セットのDEMデータを作成した。

c) DEMと実測河川地形との比較による精度検証

4セットのDEMデータと，ADCPにより実測した河床地形と比較を行う。精度検証にあたって，検証サイト内に6本の検査断面を設定し，6断面における河床形状を比較した。これまでの手順を図-2に，検査断面(Transect 1-6)を図-3に示す。

(3) 河床表層材料調査手法としての運用法の検討

UAV空撮画像に対して，画像解析に基づく粒度分布の推定を行い，面積格子法によって実測した表層粒度分布との比較を行った。粒度分布の推定は，スイス工科大が開発したソフトウェアであるBASEGRAIN^{®9)}を用いた。

UAV空撮画像を用いて河床表層材料の粒度分布を計測する着想自体は新しいものではなく，例えば寺田ら¹⁰⁾は，平均粒径200mm程度の石礫に覆われた砂州に対して，UAVの対地高度を5mから75mまで変化させて空中写真撮影し，BASEGRAINによる画像解析を行って，各高度における解析結果を合成する手法を提案している。

本研究では，撮影条件とソフトウェアの測定原理からあらかじめ予想される計測精度と，解析結果及び現地調査結果を比較した。

3. 結果と考察

(1) 実測河川地形とDEMの比較

4セット（2回の撮影，画像処理の有無）のDEMデータと，ADCPにより実測した河床地形と比較を行った。検査断面における河川横断面図を図-4に示す。図-4の黒実線は，ADCPによる河床形状を示す。

陸上部については，4セットのDEMが概ね一致しているが，水中は2回の撮影で大きく異なった。平水時の空撮画像から作成したDEMは，全体的に乱れが小さいも

の、全体的に河床が高い（水深が浅い）ように推定されている。これは，空気と水の屈折率の違いにより，空中から撮影した写真には，河床面が浮き上がって見えているためと考えられる。

出水後の増水の影響を受けているデータセットでは，可視化処理の有無に関わらず，水中の河床形状が大きく乱れている。この原因は，水面の擾乱，反射等の局所的

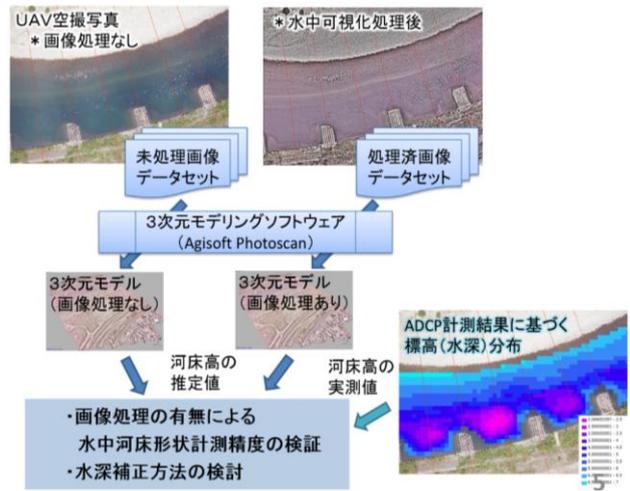


図-2 水中河床形状計測精度検証の手順



図-3 検査断面

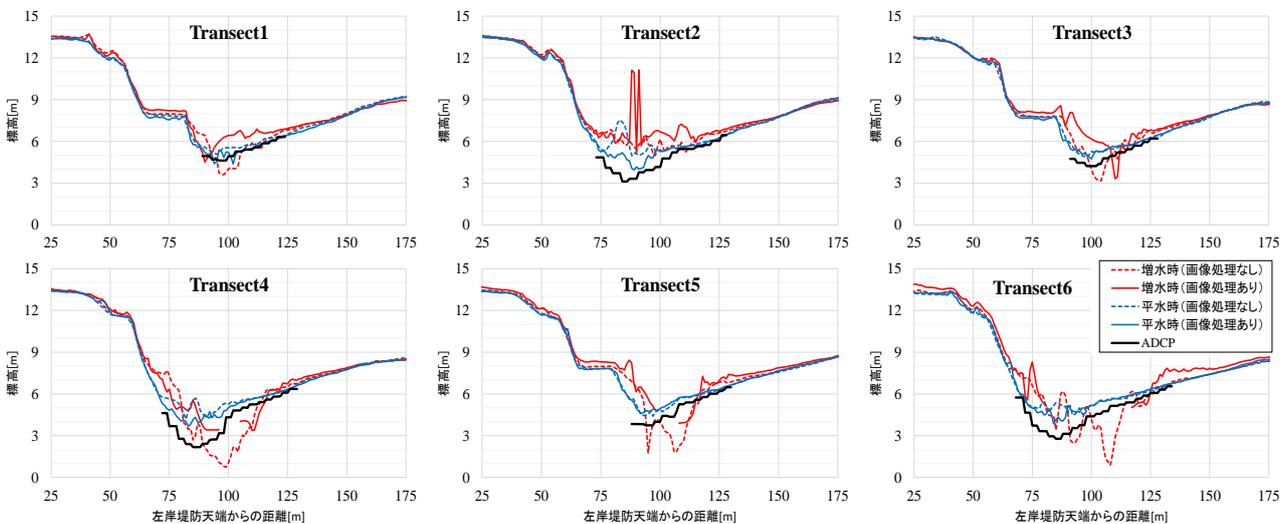


図-4 検査断面における河川断面形状 (DEM4 種及び ADCP 計測結果)

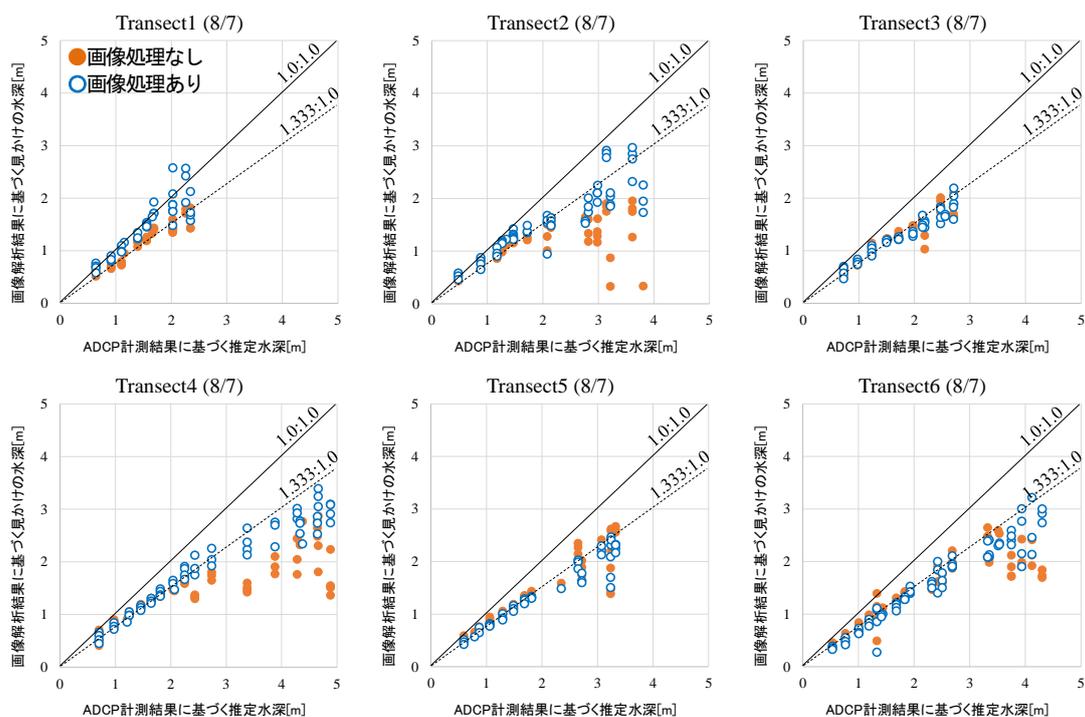


図-5 水中河床形状推定精度の検証（平水時，H27.8.7）

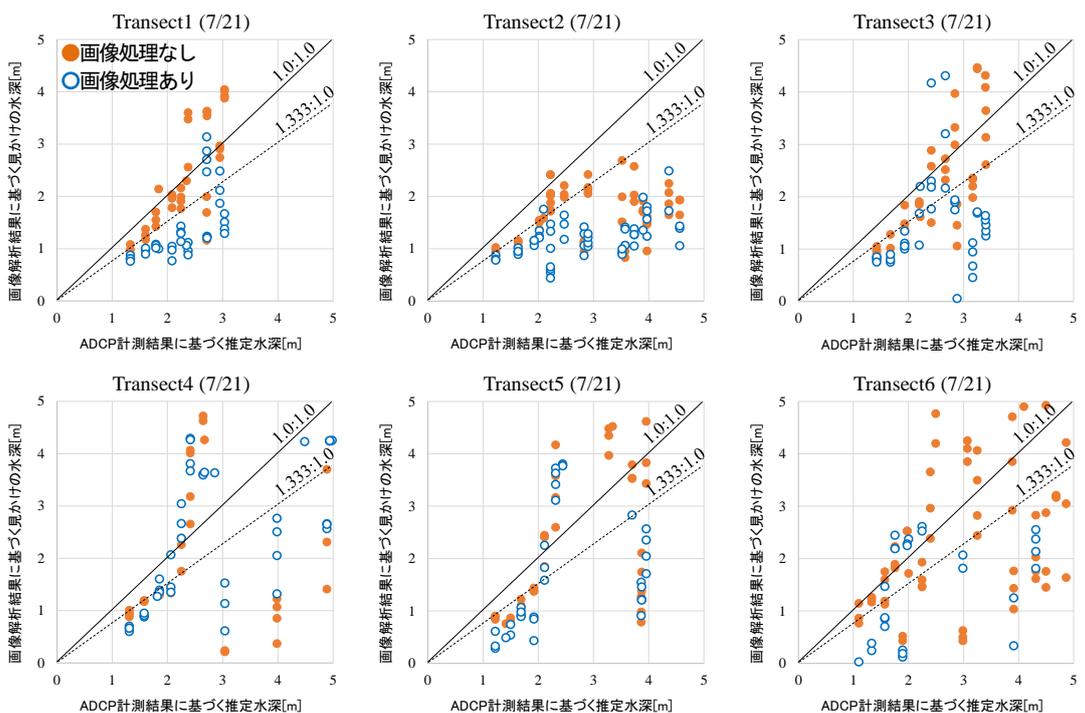


図-6 水中河床形状推定精度の検証（増水時，H27.7.21）

な条件，流水の濁り等の撮影条件の影響を強く受けているためと考えられる。次に，空気と水の光の屈折率の違いに起因していると考えられる誤差について，各計測日における各検査断面の水位を空中写真に写る水際線の位置から推定し，水深を基準として考察することとする。

(2) 水中可視化処理の有無の精度比較

4セットのDEMとADCP計測結果を，2回の撮影日における水深に換算して比較を行った結果を図-5，6に示す。

横軸は，ADCPによって計測された河床高から求めた撮影日の水深を示す（便宜上，実測水深と呼ぶ）。縦軸は，UAV空撮画像から生成したDEMモデルから推定した水深を示す。後者には，光の屈折による影響や，水面の擾乱や反射等の影響が含まれているため，見かけの水深と呼ぶこととする。実測水深と見かけの水深が等しければ，1:1の実線上にプロットされる。

図-5では，実測水深と見かけの水深の間に，良好な線形性が確認できる。見かけの水深1に対して，実測水深

が1.3倍程度であることが分かる。すなわち、見かけの水深に水の屈折率(1.333)を乗じることにより、実測水深とはほぼ一致する関係があることが確認される。複数の異なるアングルの写真から同一の特徴点を抽出するSfMソフトウェアにおいて、このような結果が得られる理由は明解である。上空から撮影した河床はどのような角度で撮影したとしても、光の屈折率により、実際的水深より1/1.333だけ浅い位置まで浮き上がって見えている。SfMソフトウェアは陸上も水中も分けることなくこれらを機械的に処理するため、3次元モデルには水中部が水深に比例して高めに表現されることとなる。

なお、図-5において、画像処理の有無を比較すると、処理を行わない場合でも、水深2m程度までは精度良く河床形状が把握できているが、水深2m以深では、可視化処理を行った場合の優位性が認められる。一方、増水時に撮影した図-6では、画像処理の有無に関わらず、許容できない誤差が含まれている。また、水深1m程度の場所であっても、誤差が大きく、出水後の濁りの影響が原因と考えられる。

以上より、水中部の可視化処理によって、水深がより大きい領域まで河床形状を推定することが可能であること、水中の河床形状は、水の屈折率を考慮した水深の補正により実測の河床高を推定可能であること、撮影条件の影響がかなり支配的であること等の結果を得た。

(3) 表層粒度分布の画像計測結果

面積格子法により現地実測した表層粒度分布と、対地高度50mのUAV空撮画像に対する画像解析による表層粒度分布を、図-7に示す。各地点の粒径加積曲線における点線は、画像解析による粒度分析にあたってあらかじめ想定された計測限界である40mmを示す。

画像解析による粒度分布の推定では、粒子の輪郭を抽出する画像解析の原理より、1粒子あたり最低でも3pixel以上で写っている必要がある。従って、UAVに搭載されたカメラの焦点距離、対地高度、撮像素子の大きさ、画像の画素数から求めることができる画像の空間解像度(1pixあたりの距離)から、識別可能な石礫粒子の大きさをあらかじめ推測することが可能である。

本研究に使用したUAVに搭載されているカメラを用いた対地高度150mの撮影では、空間分解能が4cm/pixelとなる。同様に、対地高度100mでは約2.7cm/pixel、50mでは約1.3cm/pixelとなる。1粒子あたり最低3pixelは必要であるとすれば、対地高度50mでは4cm以上の粒子を判別可能と考えられる。

図-7では、5地点中3地点において、粒径加積曲線が良く一致しているが、2地点においては画像解析のほうが大きめの結果となった。これら2地点は、画像解析による判別可能な限界と予想された4cmより小さい粒径の土砂がみられることと、空撮写真の端の方にある部位を使用したため、実際にはカメラからの直線距離が長いにも関わらず、画像の空間解像度は一定として解析したことによる誤差が一定量含まれていると考えられる。

これらの事項に留意することによって、あらかじめ一定以上の粒径の河床材料が検出されることを前提とした調査計画が立案可能であると考えられる。

(4) 現地調査手法としての運用方法

a) 水中地形計測の撮影条件の留意事項

現地調査による検証により、水中の撮影を目的としたUAV空撮の条件として、水面の擾乱、反射等の局所的な条件、流水の濁り等の条件を考慮する必要性が再確認された。撮影に適した条件としては、まず、濁りが少な

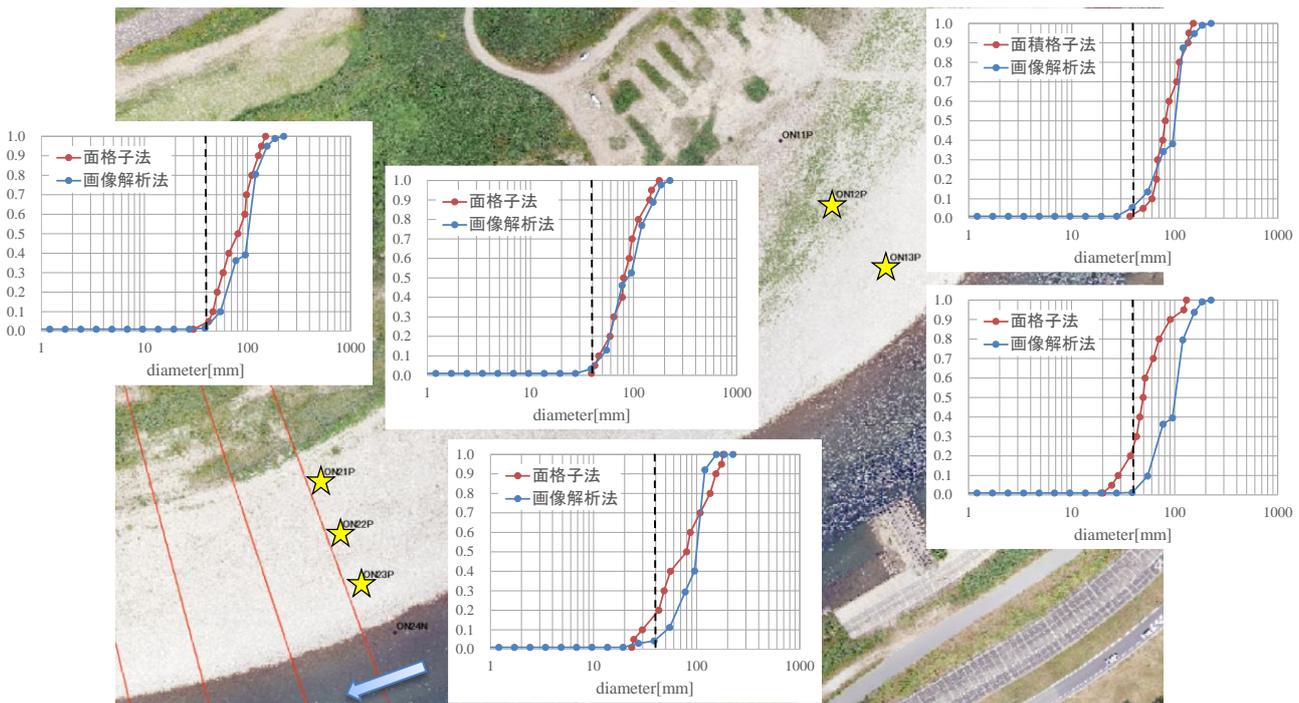


図-7 表層粒度分布の調査結果 (面積格子法及び UAV 画像解析の比較)

いことが挙げられるが、離れた河川の濁りの状況を知ることが容易ではない。国土交通省の水質自動監視を備えた観測所では、多くの場合、濁度が計測されているため、水文水質データベースのWebサイト等を参照し、濁度の時系列変化を確認することが手がかりとなる。例えば、グリーンレーザーを用いたALB計測については、計測可能深度が、浮遊物質量濃度SSとの関係から見出されている¹¹⁾。SS、濁度、透視度の逆数には正の相関があること、濁度の計測は光の透過率等により計測されており、写真撮影の判断指標として適していると考えられる。

b) 水の屈折率の補正方法の一般化

本研究では、UAV空撮写真による写真地形計測において、見かけの水深を水の屈折率である1.333倍すれば概ね正しい水深を求めることができることを示した。したがって、SfMソフトウェアにより作成したDEMモデルの水中部について、標高を一旦水深に変換し、1.333倍してから標高に戻すことにより、概ね正しい河床形状を求めることができる。標高を水深に変換する際には、水位の縦断形を水際線の標高から求めることにより、見かけの水深を求めればよい。

c) 河床材料調査の撮影条件の検討

本研究が示すとおり、撮影機材と飛行高度に基づいて、画像解析により判別可能な粒子径の目安はあらかじめ計算することができる。目標とする粒子の検出精度に合わせて、UAVの撮影高度を逆算することにより、効率的なフライト計画を立案できると考えられる。また、あらかじめ現地踏査を行い、現地に見られる河床材料径の幅を大まかに把握して、目標精度を決定する必要がある。

4. おわりに

本研究は、電動小型UAVによる写真地形計測の適用範囲を水中部まで拡大することにより、河川管理に資する付加価値の高い調査手法を開発することを目的として、セグメント1区間における現地検討を行った。

- UAV空撮画像に水中部の可視化処理を施すことにより、より水深の大きい領域まで河床形状を推定することが可能であることを示した。
- 水中の河床形状は、水の屈折率を考慮した水深の補正により実測の河床高を推定可能であることを示した。併せて、撮影条件の影響がかなり支配的であることを確認し、その要因のうち主に透視度について考察した。
- UAV空撮画像をもとに、河床表層材料の粒度分布の推定を試みた結果は、画像解析手法の原理から予想された判別可能な粒子サイズの限界と一致し、それよりも大きい粒子が卓越する場においては、現地調査と概ね一致する粒度分布が得られた。

本研究の成果は、UAVを活用した河川地形計測、河床環境のモニタリングの一助となる知見を提供するもの

であるが、現場で安定的に運用するための知見としては不十分な点もある。今後、各地での運用を通じてノウハウが蓄積・共有されていくことを強く期待する。

謝辞：長良川における各種資料の貸与及びADCP調査を実施していただいた国土交通省中部地方整備局木曾川上流河川事務所調査課に深く感謝を申し上げます。本研究は、河川砂防技術研究開発助成（平成27年度 U A Vと水域可視化処理による河川地形の新しい計測手法の開発に関する研究、代表者：沢田和秀）に基づいて実施された。

参考文献

- 1) 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調査編（平成26年4月改定）, 735pp., 2014. (URL: http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/)
- 2) 中村秀至, 関本義秀, 檜山武浩, 坂下裕明, 宮作尚宏, 川村裕: 河川における航空レーザー測深技術の適用可能範囲推定方法の開発, 写真測量とリモートセンシング, 53(5), pp.213-218, 2014.
- 3) 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の実装展開に向けた比較検討, 河川技術論文集, 21, pp.105-110, 2015.
- 4) 小花和宏之, 早川裕式, 齋藤仁, ゴメス クリストファー: UAV-SfM手法と地上レーザー測量により得られたDSMの比較, 写真測量とリモートセンシング, 53, 2, pp.67-74, 2014.
- 5) Westaway, R. M., Lane, S. N., Hicks, D. M.: The development of an automated correction -procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 2, pp.209-226, 2000.
- 6) Javernick L, Brasington J, Caruso B.: Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*. 213, pp.166-82., 2014.
- 7) 鈴木英夫, 長谷川美空, 青木利昌: 高ダイナミックレンジ画像を用いたコントラスト改善画像の適用について, 日本写真測量学会春季学術講演会発表論文集, A-2, 2014.
- 8) Detert, M., Weitbrecht, V.: Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains—a free stand-alone tool, *River Flow 2012*, R.M. Muñoz (Ed.), Taylor & Francis Group, London, pp.595-600, 2012.
- 9) Detert, M., Weitbrecht, V. : User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN: *Advances in Science and Research*, S. Fukuoka, H. Nakagawa, T. Sumi, H. Zhang (Eds.), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00062-9, pp. 1789-1795, 2013.
- 10) 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, 土木学会論文集B1 (水工学), 71, 4, pp.I_919-I_924, 2015.
- 11) 坂下裕明: 河川縦横断測量を高度化、効率化するための航空レーザー計測適用に関する研究, 河川砂防技術研究開発成果概要, 9pp., 2014. (国土交通省HPにて閲覧)

(2016.4.4受付)