

# 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

## COMPARATIVE INVESTIGATION OF THREE AERIAL SURVEY METHODS FOR RIVER CHANNEL SURVEYING

佐貫 方城<sup>1</sup>・渡辺 敏<sup>2</sup>・宮田 真考<sup>3</sup>・草加 大輝<sup>4</sup>

Shigeki SANUKI, Satoshi WATANABE, Masataka MIYATA and Daiki KUSAKA

1非会員 理修 (株) ウエスコ 環境計画事業部 岡山自然環境課(〒700-0033 岡山県岡山市北区島田本町2-5-35)

2正会員 工博 (株) ウエスコ 環境計画事業部 関西環境計画課(〒540-0021 大阪府大阪市中央区大手通2-2-13)

3非会員 (株) ウエスコ 地理情報事業部 空間情報課(〒700-0033 岡山県岡山市北区島田本町2-5-35)

4非会員 (株) ウエスコ 測量補償事業部 岡山測量課(〒700-0033 岡山県岡山市北区島田本町2-5-35)

This purpose of this paper is to show the application of the small-medium river survey by using aerial survey technologies. We surveyed the Umetani river using Digital Aerial Cameras (DAC), Helicopter Laser Profiler (LP) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in Gifu prefecture. We have also obtained the spots of surface elevation with topographical survey in river with VRS-GPS.

As a consequence of surveying, we proved that aerial survey technologies were relative high precise. DAC was suitable for survey riverine environment in watershed scale. LP could obtain most precise surface elevation. UAV could survey river channel not only under the terrain canopy but also under the water depth up to 70cm. We proposed to apply aerial survey technologies to river survey in consequence of some good points.

**Key Words :** River surveying, Digital Aerial Cameras, Laser Profiler, Unmanned Aerial Vehicle, river management, Digital Surface Model, Digital Elevation Model

### 1. はじめに

近年、計画規模を超える出水がしばしば発生し、とりわけデータストックが不足する中小河川での災害が目立つ。中小河川でも、治水や環境を考慮した河道計画の検討が進められてはいるが、縦横断測量による河道地形情報、写真等の基礎データが依然不足することが多い。写真情報だけでもあれば、事前に、リスクの軽減や合理的な危機管理が図れたであろう悔やまれるケースも少なくなく、災害対応にとっても、同データ空白地の解消は急務かつ重要な課題となっている<sup>1)</sup>。

しかし、これまでの現地測量のやり方では、広域的なデータ取得において、非効率かつコスト的な制約により対応が困難な局面が多い。現状の現地測量は、現場で2~3人がかりで一日150~200点、10ha程度の面積にとどまる。

川の自然環境は常に変化している。ヤナギ類は伐採後数年で高木サイズに戻る<sup>2), 3)</sup>。その速度に合わせ

て、川の容積等の変化を丁寧に監視、計測することは、国が管理する河川でも現実的には難しいとされてきた。どの程度の精度が要求されているのか再考も必要と思うが、川のごく一部の計測結果を掛け算して説明することに比べれば、大雑把でも全体の状態を面的に把握しておく方が、計画、維持管理には役立つことが多いと考えられる。

航空測量（以下、航測とする）技術を活用すれば川の地形や自然環境の状態を効率よく把握できる<sup>4), 5), 6)</sup>。心配なのは精度である。どこまで航測で計測できるのか、どの部分を人的作業で補う必要があるのか、未だ多くの現場技術者には知られておらず、関心を持つ者すら多いとは言えない。現在では複数の航測技術があるが、単独の技術で、全ての課題を解決できるわけではない。それぞれの航測技術が、現場で活用できるレベルであることをアピールするが、複数の航測技術の組み合わせによって、お互いの課題を効率よく解決できる方法を示した例は、あまり見当たらない。

本研究では、デジタル航空カメラ（以下、デジ航という）、無人航空カメラ（以下、UAVという）による写真測量、ヘリコプター航空レーザ測量（以下、ヘリLPという）、ならびに現地測量（以下、実測という）を、同一河川で同時に行った点を特徴とする。使用した航測技術を図-1に示す。各測量手法の精度と作業コスト、現場で使用する際の制約や他にない長所など、比較した結果を報告する。

## 2. 検討方法

### (1) 対象河川と調査区間

測量対象とした梅谷川（岐阜県）は木曽川水系相川の支川である。幅約10～20mで、山地から水田地帯を通り市街地に向けて流れる中小河川である。約2.0kmの中で、異なる河道景観を有する上中下の3区間（200m/区間）を抽出した（図-2参照）。

上流区間の特徴として、土羽護岸を有し、河岸を高木の樹木が覆うように生育している。中流区間は単調であることを特徴とする。護岸はコンクリートの直壁で、連続する床止めが河床の起伏も単調化させ、平常時から川幅いっぱいには薄い水面が広がる。下流区間は川幅が広く蛇行する。交互砂洲が形成され、砂洲上には草本植生が発達する。

### (2) 横断面形状の取得

#### a) 実測

精度評価の基準とする現地の実測データは、トータルステーション（Nikon-Trimble社製、S6 Series）およびVRS-GPS（Nikon-Trimble社製、5800GPS）を使用して、横断地形を計測した。横断測線は、縦断方向に20m間隔で設定した。各測線では、0.2～1mの横断間隔で、絶対座標と、植生（河床に発達する植物群落）を記録した。計測は2014年11月下旬に行った。

#### b) デジ航

対地高度は1,400mで撮影を行った。デジタルカメラは、ベクセル社製UltraCamX（UCX）を使用した。オーバーラップ80%，サイドラップ60%とし、RGBカラー画像および近赤外画像を作成した。写真の解像度は10cm/pixelのデータを使用し、写真1枚あたりの画素数は135,900,000 pixelとした。撮影は2014年10月下旬に実施した。

#### c) ヘリLP

対地高度は300mで測量した。計測にはLaser Scanner LMS-Q680i（Rieggle社製）のレーザを搭載したLite Mapper6800-400（IGI社製）を使用した。設定はパルスレート150kHz、コース間のラップ率を50%以上確保し、18点/m<sup>2</sup>程度の点群データを取得した。計測は2014年9月下旬に実施した。

#### d) UAV

対地高度は60mで撮影を行った。UAVはα UAV

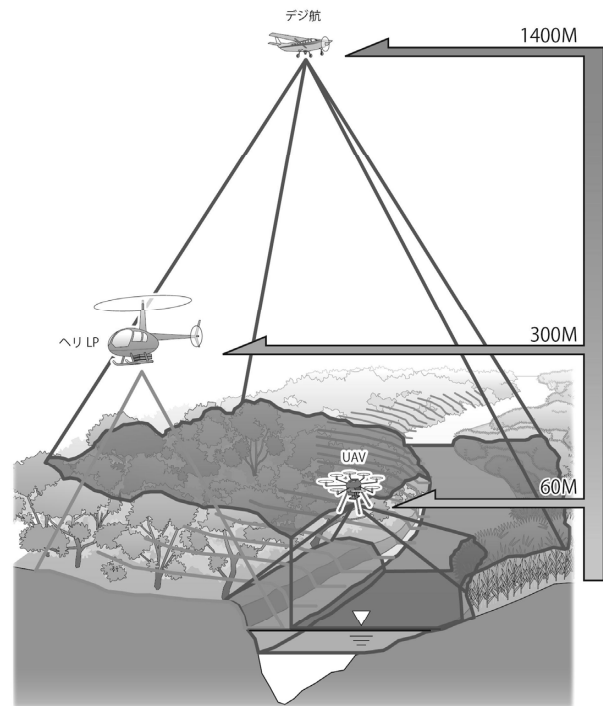


図-1 本研究で使った3種の航測技術

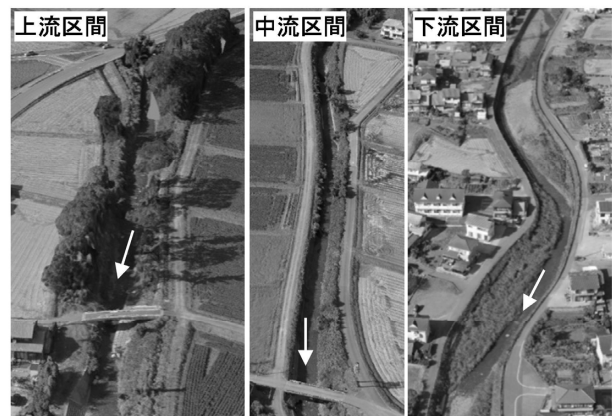


図-2 測量対象区間の状況

（amuse-onself社製）を使用した。撮影はLUMIX GX7（画素数約1,610万）を使用し、オーバーラップ80%，サイドラップ60%とした。写真の解像度は1.4cm/pixel、写真1枚あたりの画素数は15,800,000 pixelとした。撮影は2014年11月下旬に実施した。

### (3) 横断面形状の比較

#### a) 航空写真（デジ航、UAV）から測量点の取得

撮影後の写真は、隣接した画像をもとに同一地点の位置のずれ（視差）を利用し、画像相関により三次元情報を自動的に抽出し、DSM（数値表層モデル）データを生成した（デジ航：Inpho社製、MATCH-T、UAV：オーク社製、Agisoft PhotoScan Professional edition）。DSMに利用するポイントデータの測点間隔は、デジ航で25cm、UAVで1.4cmとした。

#### b) レーザ測量から測量点の取得

計測で得た点群データからフィルタリング処理によりグラウンドデータを抽出した。グラウンドデー

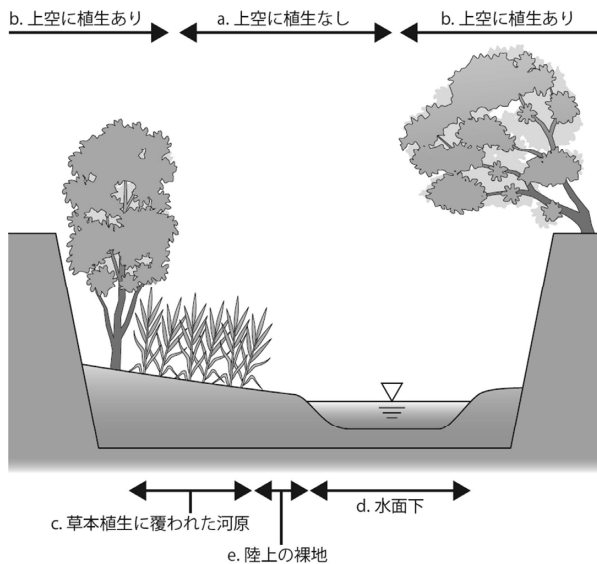


図-3 横断形状の比較対象

タから内挿補完処理によって25cm間隔のDEM(数値標高モデル)を生成した。

#### c) 測量精度の比較方法

取得したDSMおよびDEMデータはTIN(Triangulated Irregular Network) 処理後、現地実測で得られた横断測線上の表層高(DSM)または地上高(DEM)を抽出した。つぎに、それぞれの測量手法による横断形を重ね合わせて長所短所を比較し、実測値との差分の絶対値から得た平均値によって誤差を定量化した。

#### (4) 測量コストの比較

測量コストについて、本測量での費用を基準にして相対的に比較した。比較する空間スケールは、リーチ(約5ha, 本研究の規模)、セグメント(約500ha)、水系スケール(約50,000ha)に拡大した場合を想定し、最もコストの小さいUAVのリーチスケールを1として、およそ何倍のコストが必要かを見積もった。

### 3. 結果

対象別(図-3参照)の長所短所、精度、コストの違い、比較結果を述べる。

#### (1) 長所短所の比較

##### a) 上空に植生がない場所

いずれの測量結果も、上空に植生がある場合と比較すると誤差は小さかった(図-4)。

##### b) 上空に植生がある場所

上流区間で比較する。上空に植生がある場所とは、河岸に生育する植物の枝葉が、川の上でひさしのように覆いかぶさった状態をいう。上空の植生には、河畔樹木の樹冠と護岸に生育する低木、ツル植物などがあつた。実測とのズレは、デジ航、UAV、ヘリLPの順に大きかった(図-5)。その差は歴然としてい

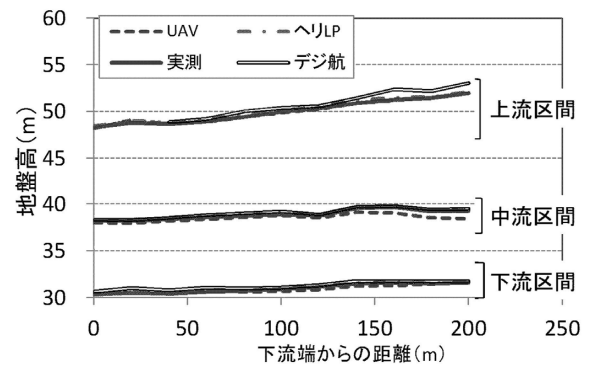


図-4 上空に植生がない場所の縦断面図

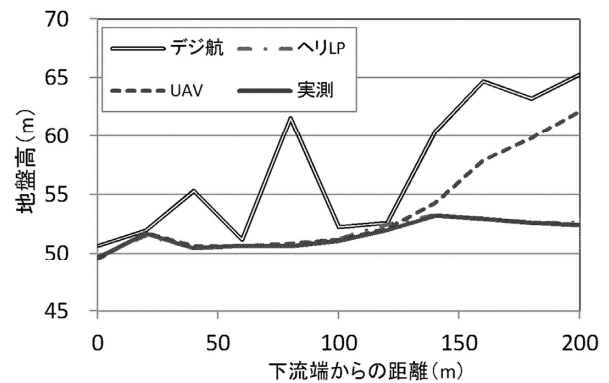


図-5 上空に植生がある場所の縦断面図(上流区間)

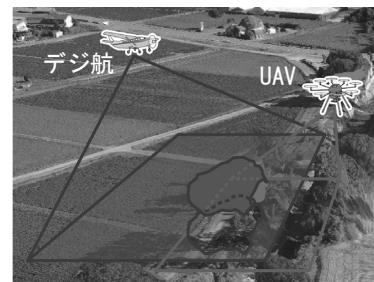


図-6 上空に植生がある場所の撮影状況

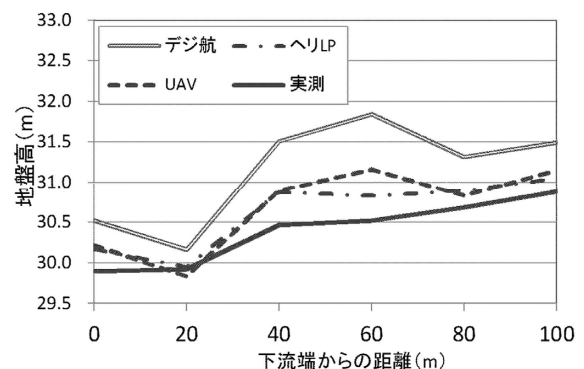


図-7 ツルヨシ被覆箇所の縦断地形(下流区間)

る。ヘリLPは河畔林の樹冠があつても、多くの場合は河床地形が把握できていた。UAVは、樹冠下の河床地形が一部計測できていた(図-6)。デジ航は上空の植生の影響をその都度受けていた。

### c) 河床を草本植生が被う場所

ツルヨシが砂州上を被う区間で比較する。デジ航の計測結果が常に高かった（図-7）。ヘリLPは河床よりも少し上の植生塊の最も密な位置を計測していた（図-8）。UAVの計測結果は、ヘリLPに沿うように表れたが、今のところ理由は定かでない。

### d) 水面下

水が透明で水深が浅い今回の調査地の計測結果に限れば、UAVは、水面下の地形も概ね把握できていた（図-9）。他方、LPとデジ航は、ほぼ水面の高さを計測していた。著者らの経験では、水深1.5m程度までなら、デジ航でも水面下の地形が再現できたケースは少なくない。しかし、今回の調査地の水面はほぼ全ての区間で波立っていたため、水面下が計測できなかったと推測している。

## (2) 精度比較

### a) 上空に植生がない場所（図-4）

UAVでの平均誤差は、上流区間で0.08m、中流で0.35m、下流で0.14mであった。各区分11断面の誤差の平均を平均誤差とした。同様に、ヘリLPの平均誤差は、上流区間で0.21m、中流で0.15m、下流で0.09mであった。デジ航の誤差は、上流区間で0.54m、中流で0.18m、下流で0.26mであった。なお、デジ航の上流区間で1箇所約3.7mの誤差があった場所は橋梁によるものであり、上記の平均誤差の算出には含めていない。

### b) 上空に植生がある場所（図-5）

最も平均誤差の小さかったのはヘリLPで、実測との違いがほとんどなく、平均誤差は0.12mであった。現地の平均的な石礫サイズが20cmを超えることを考慮すれば、誤差はないといってもよい。デジ航とUAVは、写真に写った対象物の高さを計測する。撮影した写真で河畔林が河床の上空を覆う場合は、樹冠表面の高さを計測していたため、精度誤差の対象にはしなかった。

### c) 河床を草本植生が覆う場所（図-7、図-8）

平均誤差はデジ航で最も大きく0.70m、次にUAVで0.30m、ヘリLPで0.14mであった。

### d) 水面下の計測状況（図-9）

誤差はUAVが最も小さく0.05mであった。デジ航は0.27m、ヘリLPは0.36mであった。対象区間の最大水深は72cmであったが、UAVではその最深部についても、水面下の河床地形を精度良く計測できていた。

### e) 陸上の裸地（図-10）

平均誤差は、デジ航が0.16m、ヘリLPが0.09m、UAVが0.15mであった。同じ場所で複数回実測をしても生じる誤差レベルである。

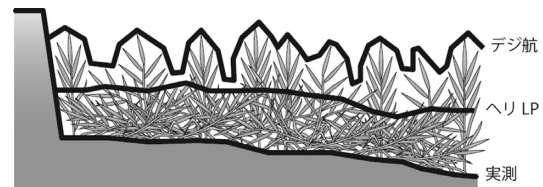


図-8 ヘリLPが計測した箇所（下流区間）

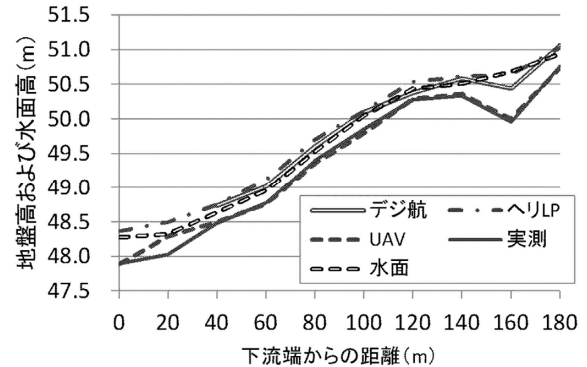


図-9 水面高と各計測地盤高の縦断面図（上流区間）

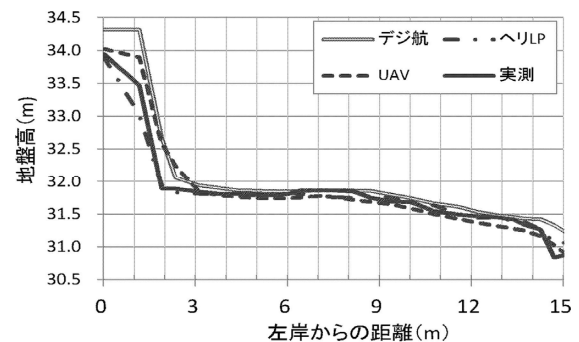


図-10 裸地箇所の横断面図（下流区間）

表-1 空間スケール別のコスト比較

航測技術	対象スケール		
	水系	セグメント	リーチ
デジ航	50	10	2
LP	100	15	3
UAV	100	13	1

## (3) コスト比較

各航測技術に掛かる概算コストを、空間スケール別に比較し、コスト面からみた河道地形測量の最適化を検討した（表-1）。リーチスケールでのUAVのコストを基準とし、その他のコストは基準に対する比率で表している。最低限必要な飛行機やヘリのチャーター費、飛行計画の手間などを考慮すれば、リーチスケールより空間スケールが小さいと、相対的にUAVのコストはより小さくなる。一方、セグメントスケール以上なら、空間スケールが大きいほど、デジ航による費用対効果が高くなる。水系スケールになるとUAVによる計測は現実的ではない。

## 4. 河川管理への適用

それぞれの航測技術に得意とする部分、苦手な部分があることがわかった。ここでは、今後の実装展開に向けて、課題と補い合える点等を述べる。

### (1) 各計測技術の長所

#### a) デジ航

高高度撮影の利点を活かして広域の測量を得意とし、対象スケールが大きいほど費用対効果が高い。河川環境を把握するのに十分な解像度の画像（10cm/pixel）と地形データを面的に取得できる。水系レベルで植生等河川環境の状態や治水上の危険箇所を概観する場合に役立つ。

ひと手間かければより役立つデータになる。例えば、水理計算で断面や平面データを使用する場合は、堤防や護岸の法肩、法尻などの境界線だけは、溢れるか溢れないかを予測の正確さを大きく左右するため、実測精度で明確にしておきたい。その際には、航測の世界では従来から行われている図化作業で、ブレイクラインとよばれる連続的に標高を保持するラインデータを作成する（図-11参照）。撮影した写真から自動図化で作成した地形図を人的図化で補ったHybridの地形図である。人的図化を行うオペレーターにとって、縦断的な線を入れるだけのこのひと手間は、河道内の地形をコンターで表すことに比べれば一瞬の作業である<sup>6)</sup>。

デジ航の最大の短所は、植生に被われた場合に河床地形が把握できない点にあった。植生の表層はほぼ正確に計測できるので、植生の高さがわかれば、それを差し引くと地盤高の補正ができる。植生高を差し引くべき場所、植生域の抽出は、近赤外画像で自動抽出も可能である<sup>6)</sup>（図-12参照）。

#### b) ヘリLP

UAVと比較すると高高度撮影であり、コスト面を考慮するとセグメントスケールでの測量に適している。植物の影響を受けにくく、地形データを最も精度よく取得できる。測量時には雲の影響を受けにくく、雨天以外は測量が可能な点においては、デジ航と比べて機動性が比較的高い。

レーザ光は水面を反射するため、水面下の河床地形は計測できていない。また、ツルヨシのように植生が密生している場合、レーザ光が地盤高に到達しないケースもあるため留意が必要である。

#### c) UAV

対地高度100m以下の低高度撮影を主とするため、狭域の測量を得意とし、デジ航より高解像度の画像（1.4cm/pixel）を同時に得ることができる。リーチ以下の空間スケールで詳細な情報を取得することに

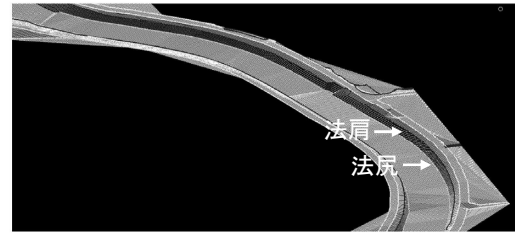


図-11 手作業で作成したブレイクライン



図-12 RGB画像（左）と近赤外画像（右）

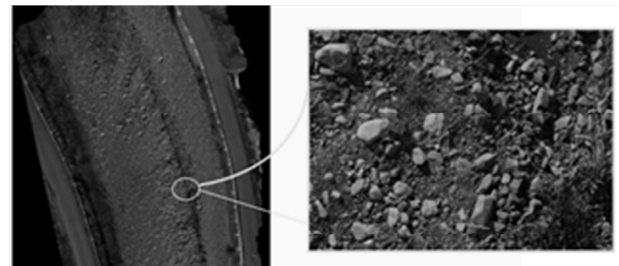


図-13 UAVによる近接画像  
（対地高度10m、解像度3mm/pixelの場合）

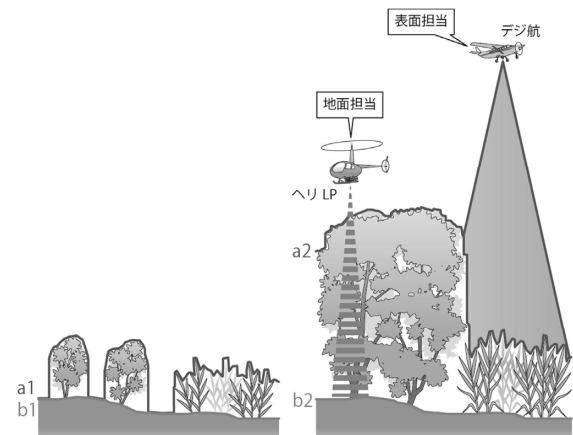


図-14 植生分布と河積変化の追跡

適しており、小さい面積ほど相対的な費用対効果は高くなる。また、UAVには、持ち運びできる機動性の良さがある。

一部樹冠下の河床地形や水面下の地形を計測することがわかったのは、意外な長所であった。

低高度撮影によって写真解像度は文句なしに良い。植生区分、瀬・淵区分はもちろん、河床の粒径判定にも使用できる。図-13は、試しに対地高度10mで撮影した写真であるが、1cm以上の粒径が全て判読できた。線格子、面格子法による現地の粒径測定と比較すれば、机上で好きな範囲、位置の粒径分布が効率よく把握できるし、危険な場所に行かなくて済む。被災直後の植生が発達しない場所の調査コスト削減、リスク回避に役立つ。ただ、デジ航やヘリ比

べれば、特に回転翼型UAVは飛行速度が遅いため、水系、流域スケールの計測には時間がかかる。

## (2) 苦手な部分を補って現場の課題を解決する

### a) 河積の変化の把握

デジ航とUAVは、植生の分布位置を写真で正確に把握できるが、植生があれば河床面の計測は難しい。図-14に示すように、デジ航、UAVのDSM (a) からヘリLPによるDEM (b) を引き算すれば、植生のボリュームが把握できる。樹木伐採による改善効果が定量的に把握できる。

なお、ヘリLPのファーストパルス（最初に反射してくるパルス）を使用すれば、植生の表面高さも計測できるので、ヘリにデジカメを搭載すれば、デジ航、UAVの撮影は不要となる。

### b) 水面下の地形を把握する

航測技術は水面下の地形計測を苦手とする。UAVでも、水が濁ったり、水深が深いと、水面下の標高計測は困難となる。緑レーザを用いた航空レーザ測深機(Airborne Laser Bathymetry)による水面下の河床地形の把握が検討されているが<sup>7)</sup>、実用段階には至っていない。

最近では、深浅測量にGPSとソナー（音響測深機）を搭載したラジコンボートが活用されている（図-15）。あらかじめ位置座標を入力しておくことで自律航行を行うため、人的コストも削減できる。今現在市販されている上記ラジコンボートは、水深1m以下の浅い場所が計測できない。エラーが出る。UAVやデジ航で水深の浅い場所の計測がカバーできるなら、お互いの苦手な部分を補い合うことができる。

## 5. まとめ

本研究では、中小河川で不足している河道地形や写真等の基礎データを、効率的かつ精度良く取得することを目的に、航空測量技術(航測)の実装展開にむけた検討を行った。航測は、デジタル航空カメラ(デジ航)、ヘリコプター航空レーザ測量(ヘリLP)、無人航空写真測量(UAV)の3種類を使用し、精度、効率等の点から長所短所を比較した。

治水、環境の分野で、20年以上の経験をもつ技術者でも、現場のチラ見では、その場の課題を一部説明は出来ても、その川の特性を踏まえた本質的な改善策を計画ことは難しい。本研究で使用した航空測量の地形、写真データは、河川を計画、維持管理するレベルで対象河道を分析する際に役立つことが実感できた。一部の不利な条件を除けば、トータルステーションを使用した現地実測の結果とそん色ない精度が得られることがわかった。現地の地形の凹凸と、人による測量の誤差、粗さ、水理検討に必要な精度を考慮すれば、航測による精度は十分で、一次元データでなく、二次元データや三次元データが得

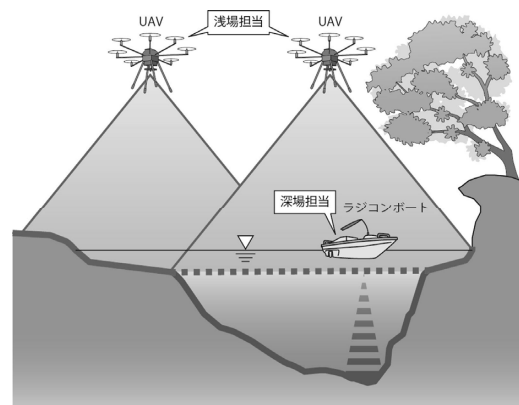


図-15 水面下はソナーボートで測量の効率化

られることを考慮すれば、むしろデータの精度は高いとっても過言でない。

各測量技術のそれぞれに長所も短所もあることがわかった。それぞれがマルチにできることを競い合うより、複数の測量技術の長所短所を客観的に知り、組み合わせて対応する方が柔軟で、今はコスト、効率において現実的であるような気がする。いずれにしても効率が良い。今後も、ますます活用される場は増えると思われる。

**謝辞：**本研究の実施に際して、国立開発研究法人土木研究所水環境研究グループ水環境研究グループ自然共生センター、大石哲也研究員、高岡広樹専門研究員にご協力をいただいた。末筆ながら、ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 藤田光一：中小河川の治水安全度を早急に把握せよ（特集1 今までにない自然災害に立ち向かう）、国土技術政策総合研究所、国総研アニュアルレポート、vol. 5, pp12-15, 2006.
- 2) 渡辺 敏, 前野詩朗, 渡辺秀之, 志々田武幸：旭川におけるヤナギ林の拡大機構とその抑制管理手法に関する検討, 河川技術論文集, 第11巻, pp. 77-82, 2005.
- 3) 佐貫方城, 大石哲也, 三輪順二：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) 国土交通省国土技術政策総合研究所水害研究室, 航空レーザ測量を活用した治水安全度評価, <http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/seika.files/lp/>
- 5) 大石哲也, 萱場祐一, 加瀬瑛斗, 渡辺敏, 高岡広樹：デジカメ航空写真による中小河川の地形データ作成と河道計画への適用可能性, 土木学会論文集B1 (水工学), vol. 68 No4, I\_1339-I\_1404, 2012.
- 6) 渡辺 敏, 赤井晋也, 加瀬瑛斗：デジカメ空撮による中小河川の河道地形データの作成と管理への適用, 建設コンサルタンツ協会 近畿支部 第45回研究発表会, 2012.
- 7) 岡部貴之, 坂下裕明, 小澤淳真, 下村博之, 蒲恒太郎, 宮作尚宏, 河村裕, 浅沼市男：ALBの河川縦横断測量への適用性の研究, 河川技術論文集, 第20巻, pp. 55-60, 2014.

(2015. 4. 3受付)