# 河川環境調査における ドローンを用いた流速・流量の評価 FLOW VELOCITY AND DISCHARGE MEASUREMENTS USING DRONE IN RIVER ENVIRONMENTAL SURVEYS

# 小林草平<sup>1</sup> · 角 哲也<sup>2</sup> · 竹門康弘<sup>3</sup> Sohei KOBAYASHI, Tetsuya SUMI and Yasuhiro TAKEMON

<sup>1</sup>非会員 農博 京都大学防災研究所(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
 <sup>2</sup>正会員 工博 京都大学防災研究所 教授(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
 <sup>3</sup>正会員 農博 京都大学防災研究所 准教授(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

To measure flow velocity and discharge with less effort and time by using drones in river environmental survey, flow velocity was compared between the field direct measurements and the analysis of airborne videos. Flow velocity analyzed from video by a STIV (Space Time Image Velocimetry) method was quite similar with the direct measurements for flows with >0.5 m/s and a rough water surface. For flows with <0.5 m/s or smooth water surface, flow velocity from video did not always coincide well with the direct measurements or was hardly evaluated. Despite some shortcomings, flow velocity and discharge in river environmental surveys especially in large rivers or when time and number of people are limited in field surveys.

Key Words : environmental survey, drone, video, flow velocity, discharge, STIV, DIEX-Flow

# 1. はじめに

河川平水時における流速や流量は、水生生物の生息を 左右する重要な物理条件の1つであり、河川生物や環境 の調査において欠かせない測定項目である.しかし、1 河川区間内であっても、瀬淵構造などの河床地形によっ て、流速や流量の空間的変異は大きいのが通常である. 河川内で面的な流れの評価をするには、体系的に多数の 点で流速を計測する必要があり、その調査にはそれなり の人員と時間を要する.

近年の河川調査におけるドローン使用の普及によって、 地形測量とともに生物や環境の調査においてもドローン 空中撮影が取り入れられつつある<sup>1) 2)</sup>.特に,数10m~数 100m空間スケールの河川区間を調査対象とする場合, 高度10m~100mで飛行するドローンの空撮により,衛星 画像や航空写真では捉えきれない細かい情報を得ること が可能である.また,ドローンは静止画とともに動画の 撮影ができる.10分程度の飛行の間に,区間内の複数の 場所において流れを録画することができる. 画像を用いた流速・流量の観測技術は、特に洪水時の 流れを対象に発展してきた<sup>3)4,5</sup>.一方、平水時に行われ る河川環境調査においては、動画を用いた流速や流量の 評価はこれまであまり取り入れられていない.ドローン 空撮画像を用いた河川平水時の流速の計測を試みた事例 があるが<sup>67</sup>,流速値に高い精度を求めようとすると、河 川全面への浮子散布、獲得画像の幾何補正のための複数 標点の座標計測、ドローンの動きによる撮影のブレを補 正する処理等、1か所をこなすだけでも相当の時間を要 することになる.

画像を用いた流速分析のいずれの手法においても、分 析前に画像の幾何補正が必要である.ステレオスコープ 解析技術の発展により、市販のソフトウェアを用いて、 幾何補正に必要な画像上の座標や地形情報をドローン空 撮画像から手軽に推定できるようになった.また、画質 や撮影条件が多少悪くても流速の分析が行えるSTIV法

(Space Time Image Velocimetry) <sup>3)4)5)6)</sup>が様々な河川で洪水時の流速計測に適用されつつある.しかし,波紋や水面浮遊物などによる水面の動きが限られている平水時に,しかも固定されていない(不動ではない)ドローンのカ

 表-1	研究対象とした河川,	水流の特性.		
川・地点	河川区分	地点数	水面幅 (m)	水面勾配
 木津川・16k 付近	平地砂河川	1	80	0.008
小渋川・小渋ダム直下	山地礫河川	1(2期)	15	0.03
耳川・西郷ダム下流	山地礫河川	4	6-14	0.005-0.02
トリニティー川(米国)・ ルイストンダム下流の側流	山地礫河川	1	5	0.01



図-1 STIVの解析に必要な標定点及びカメラの座標設定,検査線,輝度勾配(木津川の地点を例に).

メラで撮影された画像にこの手法がどれくらい適用でき るかは不明である.本研究は、河川環境調査における流 れの測定の短時間化・簡易化の可能性を探る一端として、 ドローン空撮動画から流速や流量をどの程度正確に評価 できるかを野外調査から確かめた.

# 2. 方法

ドローンによる空中撮影と流速計による流れの計測を 3河川6地点(木津川,耳川,米国トリニティー川)で 行った.また,ドローンによる空中撮影のみを1河川1地 点(小渋川)で異なる時期に2回行った.各調査地点に おける流れの特性を表-1に示す.

## (1) ドローンによる空撮

ドローンとして4枚回転翼のDJI Phantom3 Professional (DJI Science and Technology社)を使用した. これに 4000×3000ピクセルで画像を取得するデジカメが搭載されている.各地点においてまず,対象区間のオルソ化画像と後述の解析時に必要となる標点の座標を取得するため,高度50~100mから静止画像の撮影を行った.カメラのレンズが真下を向いた状態で,河川縦断方向に2~3回往復するように飛行し,前後の画像どうしが60-70%以上重複するように,15分程度の飛行の間に全体で100-300枚の画像を撮影した.撮影に前もって,流れの解析の対象とする場所に標識を設置した.

各地点において1つの瀬を対象に30秒から1分程度の動 画撮影を行った.ある飛行高度でドローンをホバリング の状態にして、カメラを真下に向け動画撮影を行った. 水面になるべく近い方が水面の動きが録画できるであろ うと考え,流れ幅全体と標点が画像に含むぎりぎりの低 い高度で撮影した.

#### (2) 流速計による計測

各地点で対象となる瀬において1横断線を設けて、流

れ幅とともに5~10点で水深とプロペラ式流速計(VR-301及びVR3T-2-20N, ケネック社)による計測を行った. 各点において流速は、平均流速として6割水深において、 また動画との比較用として水面付近での計測を行った. なお、現地計測における流量の計算においては、流れの 断面を横断方向に分割し、台形法で水体の幅、水深、平 均流速の掛け算により求めた.

#### (3) 動画の分析

動画による流速の分析にKU-STIV(株式会社ビィーシ ステム)を用いた.このソフトではまず,動画像を真上 から見た画像に幾何補正をする(本研究では真上から撮 影をした動画を使用しているが,補正はなお必要であ る).幾何補正した画像上に流れに対して平行な検査線 を設ける.その検査線上を水面浮遊物や波紋に相当する 輝度が移動する.検査線を時間的に積み重ね,横軸に距 離,縦軸に時間を持つ時空間画像を作成する.この時空 間画像に生じた斜め方向の輝度勾配(=距離÷時間)が 水表面の流速となる(図-1).

STIV解析における画像の幾何補正に必要な5-6の標定 点の座標は、Photoscan (Agisoft社、アメリカ)を用いて 作成したオルソ化画像とDEM (digital elevation model) から得た.Photoscanは、異なる位置から撮影された複数 の静止画像からステレオスコープの原理により高密な3 次元の点群を導き出すソフトウェアである.また、同じ くSTIV解析の幾何補正で必要となるカメラの位置とし て、動画の中心点のX座標とY座標(カメラは真下を向 けて撮影しているため)を特定した.標定点及び水面の Z座標は0mとし、カメラのZ座標には飛行高度を用いた (図-1).カメラの撮影角度は、通常はKU-STIVの解析 の中で計算により最適値が導き出されるが、本研究では カメラが真下を向く角度を強制的に与えた.

KU-STIVでは画像の幾何補正後に流速解析が可能となる.現地で流速計測を行った箇所を画像上で特定し、その付近に検査線3本を設け流速解析を行った.輝度勾配を手動で判断する場合は少なくとも10本以上の線を引き

表-2 画像の幾何補正の結果.

川・地点	飛行高 度(m)	平均座 標誤差 (m)	水面幅に 対する誤 差の大き さ(%)
木津川・16k 付近	70	0.85	1.06
小渋川・ダム直下	50	0.45-0.96	3.0-6.4
耳川・ダム下流	5-10	0.03-0.11	0.3-0.6
トリニティー川・ ダム下流の側流	30	0.91	18.3

平均勾配を求めた.

STIVにより推定できるのは水面付近の流速である. 水表面の流速から,水深の観測値を用いて全水深の流量 を推定するため,DIEX-Flow(パシフィックコンサルタ ンツ株式会社)を使用した.DIEX法(Dynamic Interpolation and EXtrapolation method)は、河川における 離散的な点や線状の流速データを運動方程式に基づいて 面的な流速データや流量データに変換するものである<sup>8)99</sup> <sup>10</sup>.計算に必要な地形(水深)には、現地で計測した値 を用いた.また、粗度計数には0.02(砂河川)または 0.03(礫河川)を、水面勾配には上記DEMから読み取っ た対象横断線の前後を含む水際の勾配を与えた.

#### 3. 結果

## (1) STIVによる解析結果の状況

どの地点でも容易に画像の幾何補正することができた. 中には平均誤差が1mを超える場合もあったが,1地点 (トリニティー川)を除き誤差は水面幅の数%未満に抑 えられた(**表-2**). 誤差が大きかった地点は,ドローン による静止画の撮影が不十分であったため,Photoscanの 解析により得られる座標に誤差があったと考えられる.

ドローンをホバリングさせた状態で動画を撮影したが、 風等の影響でドローンの位置が少しずつずれていくこと が多かった.特に飛行高度が低い場合、こうしたドロー



明瞭



ー部不明瞭だが ほぼ一定の輝度勾配



輝度勾配が不明瞭 一定でない



図-2 STIVの解析における様々な結果の例.



図-3 流速計と動画解析の流速の比較.





図-4 耳川において流速分析の結果が良かった画像(上)と悪かった画像(下).

ンの動きによって画像に写る場所が少しずつずれていった.こうした場合は、比較的飛行が安定していた動画の 一部のみを解析の対象とした.

流速解析の結果,輝度勾配の縞パターンが明瞭で勾配 が一定である場合,縞パターンらしきものはあるが勾配 が一定ではない場合,輝度勾配の縞パターンがほとんど 認められない場合がみられた(図-2).特に,現地での 流速が0.5m/s以下において輝度勾配が認められない場合 が多かった.本研究では,輝度勾配の縞パターンが明瞭 であるか,部分的にやや不明瞭な部分があっても明瞭な 部分の輝度勾配が一定である場合にのみ,流速を読み取 る対象とした.

#### (2) 動画解析と現地計測の流速・流量の比較

現地観測で0.5m/s以上の流れのある場所は、動画から の流速は現地観測の流速に近い値を示し誤差は概ね ±0.05m/s以内であった(図-3).流速が0.5m/s以下の流 れの場所では、動画からの流速と現地観測の流速にずれ が生じる場合が多く、一部の場所では輝度勾配が不明瞭 なため流速の評価が行えなかった(図-3では解析による 流速を0m/sとして表示した).動画からの流速分析の結 果が全体として良かった1つである木津川の地点では、 流れは比較的穏やかで水面に際立った波立ちはなかった が、細かい水面の凹凸によって日光の反射が流れに沿っ て動いていた(図-1参照).また、耳川において、尖っ た波立ちのある地点では流速分析の結果が良かった(図 -4). 一方, 流速が遅くて水面に凹凸はあるが尖った波 立ちがなく, 陰であったため日光の反射がなかった耳川 の別の地点(図-4)では、1横断線の全点に渡って流速 が評価できなかった.

KU-STIVとDIEX-Flowを用いて推定した流量は、現地 流速計測データから計算した流量と似通った値となった (図-5,ただし、流速を評価できなかった耳川の地点を 除く).水際に近い点で流速が小さいために動画から流 速が読み取れない地点もあったが(その場合はその点の 流速を0m/sとして流量を計算した),水際は水深も小さ いため、もともと全流量に対する寄与が小さく、流速が 評価できなかったことの影響は小さかった.

#### (3) 流速空間パターンの評価の試み

STIVは直線である検査線上の流速を解析するため、 本来は川幅全体の流れや横断的な流速の変異を扱うが、 検査線を横断的にも縦断的にも繰り返すことで、二次元 的な流速空間分布を評価することも可能である.

小渋川の小渋ダム下流における地点で流速空間分布の





流速(m/s) ■水面上 ■0-0.5 ■0.5-1 ■1-1.5 ■1.5-2 ■2-2.5

図-6 小渋ダム下流地点における異なる時期の流速比較(左側: 2016/3/8,右側: 2018/1/18).

評価を試みた.この地点では2016年と2018年の冬季にほぼ同条件で同じ場所において動画を撮影している(図-6の上).2016年の撮影時においてダム下流の河床は粗粒化していたが、その後にダムの排砂バイパストンネルの運用によって下流に土砂が供給され、2018年の撮影時には河床の粗粒化は一部解消された状況であった.なお、小渋ダム下流では平水時において維持流量として一定の流量(0.72m<sup>3</sup>/s)が放流されており、2つの時期の流れの違いは河床変化によるものである.動画において対象とする瀬を中心に1m四方のグリッド(縦15コ×横20コ)を設け、各グリッドに検査線をひきグリッド単位でSTIVによる流速の解析を行った.

いずれの時期においても、流れの弱いグリッドにおい て一定方向の水面の動きはほとんどなく、0.5-0.6m/s以 下と思われる流速についてはSTIVで評価できなかった (その点の流速は0m/sとした).STIV解析の結果,平 均流速(図-6),流速0.5m/s以上のグリッド数(2016年 時:93→2018年時:108)等によって、2018年時におい て全体的に流速が大きいことが示された.流速が大きい 一方で,ばらつきの指標である変動係数は小さかった. 2018年時は、土砂が供給され河床に堆積したことで、 2016年時よりも水深が浅くなり水面幅が大きくなり、全 体的に流速が高まった印象を現地では受けていた.また、 2016年時においては大きい流速は横断的には流心に、縦 断的にはステップ(礫段)の箇所に集中していたが、 2018年時は大きい流速の空間的な集中が薄まった印象が あった.流速の解析結果は、こうした現地での印象と一 致するものであった.

## 4.考察

水面に尖った波立ちや泡の生じる>0.5m/sといったある程度の速い流れや、水面の凸凹に日光の反射が写る流れではドローンで撮影した動画から現地計測に近い流速値が得られた.したがって、河川区間において流速が大きい場所(早瀬など)の範囲を特定したり、流速の大きい場所の川全体に占める面積割合などを評価することは、ドローン空撮動画から十分に可能と考えられる.

小さい流速では、輝度勾配が認められない、認められ

てもそれを正確に読み取れないことが多かった.水面の 光の反射が写るように撮影角度を変えてみるなど現地撮 影条件を工夫する余地はまだあるかもしれない.なお, 低飛行であるほど水面がよりはっきり撮影できるが,ド ローンの微妙な動きが撮影範囲に影響しやすくなり,ま た川全体を写すのに必要な撮影回数が増えることになり 空撮の意味が無くなってしまうため,あまり有効な策で はない.なお,小さい流速であっても泡や浮遊物が流れ ている場所では動画による流速分析は可能と考えられる.

水面幅全体の流量は、瀬であれば流速の小さい水際付 近の流量の寄与は小さいので、ドローン空撮画像からあ る程度正確な値を出すことは可能と考えられる.ただし、 流量の計算に必要な水深については、今回は現地で計測 した値を用いている.特に水面が波立っている場所や濁 度の高い場所において、ドローン空撮から水深の情報を どう得るかは、なお大きな課題である.

STIV法では検査線(流速解析箇所)の多さに応じて 解析に時間を要する.例えば,一横断線の5-6箇所の流 速を分析するだけであれば数分もかからないが,今回試 したように15×20の全グリッドについて分析して結果の チェックまですると1地点で3-4時間かかる.さらに細か いグリッドで区切った分析は可能であるが,解析にかか る時間を考えると特に明瞭な目的がなければあまり勧め られるものではない.また,STIVにおいて流向は基本 的に手動で決める必要があるため,二次元的な流れの解 析には限界がある.

特に川幅が大きく流れの速い川では、流れの中に留 まって流速計を用いて計測することは調査者にとって負 担が大きく、また数名以上の人員が必要となる.また、 一横断を計測するのにも時間がかかるため、一区間で あっても複数の横断を計測しようとすると、広い河原な どを移動する必要もあり、半日以上の作業を免れない. ドローン空撮による流速評価は、こうした状況において 特に意味が大きいだろう.

#### 5. 結論

本研究では、複数の河川と地点において、ドローン空 撮動画を撮り、STIV法により動画から流速を求めて現 地で流速計を用いて計測した流速と比較した. 流速が 0.5m/s以上で水面に十分に動きがある場所では、動画の 解析から求めた流速値は現地で計測した値に近かった. さらにDIEX-Flowにより求めた流量も、現地での計測流 速から推定された流量と同等であった.

水面の動きが小さいと流速を分析するのは難しいなど の欠点はあるものの,流量の大まかな推定や,流速の大 きい場所の分布や割合などの評価にドローン動画は十分 に使用可能である.特に,川幅や流れがある程度大きい 川で水の中での作業が困難であったり移動に時間がかか る場所や、現地で調査時間が限られているときや流速を 計測する人員が不足しているときには、ドローン空撮に よる流れの評価はたいへん有効であると考えられる.

謝辞:調査に必要な情報を提供していただいた国土交通 省中部地方整備局天竜川ダム統合管理事務所,九州電力 株式会社テクニカルソリューション統括本部耳川水力整 備事務所流域総合技術グループの方々,調査を補助して いただいた京都大学防災研究所社会生態環境研究領域学 生の高橋,肖,狩野,田住,高田の各位に謝意を表する.

# 参考文献

- 小林草平,角 哲也,竹門康弘:ドローンとサーモグラフィを 組み合わせた砂州の湧水ポテンシャルの評価,河川技術論文 集, Vol.23, pp.621-626, 2017.
- 乾隆帝,赤松良久,掛波優作:佐波川におけるオオカナダモ 被度の定量化と繁茂要因の検討,土木学会論文集B1(水工 学),Vol.60, No.4, pp. I\_1123-I\_1128, 2016.
- 3)藤田一郎、河村三郎:ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み、水工学論文集、Vol.38、pp.733-738、1994.
- 番田一郎,安藤敬済,堤 志帆,岡部健士:STIVによる劣悪な 振影条件での河川洪水流計測,水工学論文集,Vol.53, pp.1003-1008, 2009.
- Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a nonintrusive and efficient flow monitoring technique: the space time image velocimetry (STIV), International Journal of River Basin Management, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007.
- 6)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,土木学会論文集B1(水工学),Vol.71,No.4,I 829-I 834,2015.
- Detert, M. and Weitbrecht, V.: A low-cost airborne velocimetry system: proof of concept, Journal of Hydraulic Research, Vol.53, No.4, pp.532-539, 2015.
- 8) 二瓶泰雄, 木水 啓: H-ADCP観測と河川流量計算を融合した 新しい河川流量モニタリングシステムの構築, 土木学会論文 集B, Vol.63, No. 4, pp.295-310, 2007.
- 9) Nihei, Y. and Kimizu, A.: A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation, Water Resources Research, Vol. 44, W00D20, doi:10.1029/2008 WR006970, 2008.
- 10) 柏田 仁, 二瓶泰雄, 髙島英二郎, 山崎裕介, 市山 誠: 力学 的内外挿法 (DIEX法) に基づく「点」から「面」流速デー タ推定法の構築, 河川技術論文集, Vol.17, pp.23-28, 2011.

(2018.4.3受付)