大規模洪水時におけるUAVを用いたエアリアル STIV法による流量観測の検証

VERIFICATION OF DISCHARGE BY AERIAL-STIV USING UAV AT THE LARGE-SCALE FLOOD

橋場雅弘¹・藤田一郎²・萬矢敦啓³・西山典志⁴・太田陽子⁵ Masahiro HASHIBA, Ichiro FUJITA, Atsuhiro YOROZUYA, Noriyuki NISHIYAMA, Yoko OHTA

「正会員(株)福田水文センター(〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)
 ²正会員博(工)神戸大学大学院教授工学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
 ³正会員 Ph.D. 国立研究開発法人 土木研究所水工研究グループ(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
 ⁴非会員(株)福田水文センター(〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)
 ⁵非会員 国土交通省北海道開発局 札幌開発建設部(〒060-8506 札幌市中央区北2条西19丁目)

In this study, the authors proposed discharge measurement of image velocimetry using a UAV that worked even in situations where manned measurement was not possible and unmanned measurement facilities could not work. We hovered the UAV at an altitude of 50 m above the ground and shot the oblique video with ground control points. The surface velocity was analyzed using the STIV method, and the quality of the space-time image was evaluated using the Poisson's ratio index (NTI). The calculated discharge was verified by analyzing the flow resistance using the relationship between $\tau * \text{ and } \tau * '$. According to the Kishi and Kuroki diagrams, it was inferred from the proximity to the "Dune I" line that there was no significant fluctuation of riverbed waves, it was verified that a linear relationship between water level and discharge. In addition, the discharge of aerial STIV was the difference of 0.2% from the discharge calculated from $\tau * -\tau * '$ which was verified to be appropriate.

Key Words : large-scale flood, discharge, UAV, Aerial-STIV, flow resistance

1. はじめに

河川の流量観測は洪水が大規模になるほど重要度を増 す. ところが、観測可能なのは観測施設が正常に機能し ているのが前提で、大規模洪水時には、橋や堤防が危険 であったり、道路が冠水して観測所に到達できない状況 が発生する. こうしたリスクは, 近年の短時間強雨の増 加や局所化によって顕在化してきた課題である. そこで, 藤田ら¹⁾が開発した画像解析によるSTIV (Space-Time Image Velocimetry) 法は、河川表面流速を安全に短時間 で観測可能な手法として平成28年の空知川等の大規模な 災害時でも適用されている2.一方,国土交通省では, どのような条件下でも安全確実な観測を行うために、非 接触型機器による無人化観測の検討(次世代型流量観測 検討会)が始まっているが、大規模洪水時には施設の冠 水や停電等によって機能不全に陥ることが想定され、必 ずしも頑健とはいえない. そこで、無線遠隔操作が可能 な小型無人機UAV (Unmanned Aerial Vehicle)を用いた

空中撮影による表面流速測定が期待されている.藤田ら ³⁾, 能登谷ら⁴⁾ は空撮画像のブレ補正をRIPOC法とSIFT 又はSURF法で自動的に特徴点を検出する方法を開発し, UAVをホバリングさせるモードと移動させるナビゲー ションモードでの洪水流の測定に成功している. これら は原則として直上からの撮影画像を用いるため、川幅が 拡大した場合では画面に標定点を入れにくいと同時に, 直上画像の場合、水面波紋の微小な凹凸が視認しにくい という課題がある.本研究では、平成30年7月に石狩川 で発生した計画規模の出水時に行ったUAVによる画像 解析流量の算出事例をもとに、現場観測員が活用できる 実用レベルでのUAVを用いた流量観測手法を提案する. 一方で、計画規模のピーク流量は、事後の河川計画の基 礎資料となることから, 観測値の妥当性検証は重要な作 業である.しかし、検証方法が多岐にわたっていたり、 有効な手法が無いのが現状である. そこで、工藤ら50 による流水抵抗の分析を用いて、ピーク流量の検証を 行った事例を紹介し、実河川での観測流量の妥当性検証 の実用的な手法として提案する.

2. 平成30年7月豪雨(北海道)の概要

(1) 気象状況

北海道地方では、平成30年7月2日から7月5日にかけて、 停滞する前線や台風第7号から変わった温帯低気圧の接 近に伴い、暖かく非常に湿った空気が供給され続けたた め大雨となった.北海道深川市では気象庁の深川観測所 で最大3時間降水量が72.5mm(7月3日3:40)を記録し、 観測史上1位を更新した.降水量は図-1に示すように、 平成30年7月2日~7月8日の累計で193mm(音江)が観測 された.

(2) 水位状況

平成30年7月2日からの大雨によって、納内観測所では、 氾濫危険水位を超過し、昭和50年洪水時の最高水位 62.64m,昭和56年洪水の最高水位62.40mに次ぐ史上3番 目の水位61.40m(暫定値)を記録した.図-1より、7月3 日2時頃から約0.5m/時の水位上昇が発生し、7月3日12時 にピーク水位61.40mを記録した.その後、約0.5m/時の 水位低下により7月3日21時には氾濫注意水位を下回った.

(3) 現地状況

石狩川本川の氾濫により,深川市納内町付近および旭 川市神居町神居古潭において約70haの浸水と家屋4戸

(深川市3戸,旭川市1戸)の浸水被害が発生した.また, 冠水の恐れがあることから,道道旭川深川線の旭川市神 居町神居古潭~深川市納内間で7月3日10時~17時30分に 通行規制が行われ,道道湯内内園線の深川市納内~深川 市音江町でも7月3日11時~17時30分まで通行規制が行わ れたことから,納内橋は7月3日11時から通行止めとなっ た.

3. 流量観測手法

(1) 観測のタイミング

平成30年7月3日に水位ハイドロに合わせて4回(6時, 10時,19時,22時)の浮子観測を実施した.ピーク時の 7月3日12時30分には,既に納内橋が冠水の危険のため通 行止めになっていたことから,橋から浮子を投下できず, 浮子観測が不可能となった.そこで,代替手段として画 像処理型流量観測を実施するため,始めに地上カメラに よる撮影を試みた.

(2) 地上カメラによる画像処理型流量観測a) 観測機材

カメラは拡張ISO高感度カメラ (Sony社製 α7S II) で, ISOは日中のためオート, 画像解像度は1920×1080, フレームレートは30fpsで, 20秒以上の動画撮影を行っ





図-2 検査線と流速ベクトル(地上カメラ)



図-3 検査線とカメラ俯角(地上カメラ)

た.

b) 観測方法

納内橋右岸下流側に、カメラを三脚で設置固定し、20 秒以上の動画撮影を実施した.動画内には幾何補正のた めに、合計6箇所の標定点を、H型鋼や橋などの構造物 にもたせ、後日、測量によって物理座標(x, y, z)を 取得した.

c) 地上カメラの課題と解決方法

流速の解析はSTIV法 (Space-Time Image Velocimetry) を用いた.標定点をもとに幾何補正し,図-2に示すよう な流下方向の検査線を15本設定した.ここでは,計画規 模の出水で水面幅が200m程度となり,平常時の2倍以上 に広がった.また,水位上昇によりカメラと水面の比高 差が狭まったことで,カメラの俯角が小さくなり,遠方 左岸側の検査線が混みあった状況になった.藤田ら⁷⁷は, カメラから遠方になるほど空間解像度が低下して水面波 紋の識別が困難になるため,俯角の計測限界は2度程度 としている.納内の水位ピーク時の俯角を比較すると, 図-3に示すように15測線の中央に位置する検査線No.8から右岸測線(No.8~No.15)が有効で,カメラ設置位置から遠方になる左岸の半分(No.1~No.7)が不適と評価された.最も遠方の左岸No.1(208m)を俯角2度以上にするためには、カメラ高(65.99m)を8m上げる必要があることから、地上カメラでは、現地でカメラ高を上げて俯角を確保するのは困難と判断し、UAVによる空撮に切り替えた.

(3) UAV空撮による画像処理型流量観測

a) 観測機材

使用したUAVはMatrice200 (DJI社) で,カメラは1イ ンチセンサーを搭載したZenmuse X4s (DJI社) を用いた. 画像解像度は1920×1080,フレームレートは30fpsで,30 秒以上の動画撮影を行った.また,精度が±0.01°のカメ ラジンバルを装着し,撮影時のブレ対策とした.

b) 観測方法

UAV空撮で河川直上から撮影する場合は、川幅と UAVの高度が概ね一致するが、日本国内の航空法では 許可なく地表面または水面から150m以上の高さの空域 でUAVを飛行させることができないことから、川幅 150m以上の河川では、川幅全体を画像に収めることが できない場合がある。そこで、図-4に示すように、斜め 撮影により、高度を上げなくても川幅の広い河川を網羅 する手法を用いて、十分な俯角を得た動画像を取得する ことができた。あわせて、画角内に看板、橋等の構造物 (左右岸各3点)を標定点として収めた。なお、撮影は 現地状況から水面から約50mの高度でホバリングし、約 30秒間の動画像を取得した。

4. 解析結果と考察

(1) 画像処理による流速算出

表面流速の解析にはSTIV法を用いた.

a) 標定点

UAVで得られた動画像から,左右岸の標定点になり 得る構造物を抽出し,測量によって物理座標(x, y, z) を取得した.また,UAVのホバリング位置の物理座標 (x, y, z)は,機体内に記録されているGNSSデータを 抽出した.

b) 検査線の設定と俯角

水面幅が約200mのため,表-1より15本の流速測線を 検査線として設定し,幾何補正してオルソ化した画像に, 手動で流下方向に検査線を作成した.(図-5)

c)時空間画像からパターン勾配の作成

時空間画像(STI)のパターン勾配を算出する方法として、輝度勾配テンソル法が一般的に用いられているが、時空間画像(STI)の画質を明瞭にするために二次元フーリエやガウシアン等のフィルタ処理が必要であった.



図-4 UAVによる観測方法

表-1 水面幅に合わせた流速測線の目標数

水面幅	20m未満	20~100m 未満	100~ 200m未満	200m以上
浮子流速測線数	5	10	15	20

(河川砂防基準調査編より)



図-5 幾何補正(オルソ化)と検査線設定(UAVカメラ)



図-6 検査線とカメラ俯角(UAVカメラ)



図-7 検査線と流速ベクトル(UAVカメラ)

そこで,能登谷ら[®]が開発した,前処理が無くても流速 を頑健に算出可能なQESTA(Quality Evaluation of STI by using Two dimensional Autocorrelation function)を用いた.

d) 検査線とUAVカメラの俯角

UAVの地上からの高度50m (標高115.24m) とピーク 水位をもとに,検査線15本の俯角を図-6に示す.すべて において10度以上の俯角になっており,計測限界を大き く上回っており,地上カメラに比べて空間解像度の高い 計測ができていると評価できる.以上より図-7に示すよ うに,STIV法を用いて各検査線の流速を算出した.

(2) UAVのブレ評価

UAVのブレを評価するために,xyz方向のブレについ て、図-8に示すピッチ(Pitch)とロール(Roll),ヨー (Yaw)の3成分を整理した.UAV本体とカメラジンバ ルの動画像を撮影中のブレについて、UAVのログデー タから抽出した時系列の図-9~11に示す.UAV本体に ついては、±1度程度の細かい揺れが時系列で確認できた が、カメラジンバルのピッチとロールはほとんど動いて いない.唯一、ヨーだけが累計で1度程度ブレているが、 時系列の細かな振動はみられていない.これより、画像 解析に影響が無いと推察されることから、藤田ら³⁾のブ レ補正アルゴリズムは使用しなかった.7月3日12時の気 象庁深川では、北北西方向に平均風速3.9m/secであった が、ジンバルによって揺れが抑えられていることが分 かった.

ただし、図-12より、水平方向は南東方向に約0.3m程度の移動が確認されていた.これは風の影響でUAVが風下に押されたものと推察できる.鉛直方向には0.1m程度の移動がみられた.

(3) 時空間画像STIの精度評価

STIV法では時空間画像STI の質が流速の精度に影響 する. そこで、時空間画像STIの質を数値で評価する指 標として,能登谷ら⁸が提唱するポアソン比型指標 (NTI ;v-type index)を用いた. ここではNTI 1.5以上が, STI画質を良好と判定する閾値の指標としている. 図-13 に地上カメラとUAVカメラによる検査線15測線すべて の時空間画像STIのNTIを示す. これによると、カメラ より遠方の左岸側(検査線No.1~8)では地上カメラの NTIが1.5以下を示すのに対し、UAVでは1.5以上となっ た.一方で中央から右岸カメラ側の検査線No.9~15には 大きな差は見られていない. 以上より、地上カメラでは、 水位が上昇し川幅が広くなる場合は、遠方の検査線の時 空間画像STIの質が低下することがわかった. これに対 し、UAVは俯角が大きく確保できるため、時空間画像 STIの質も良く、安定した精度を確保できることが検証 できた. ただし、UAVであっても測線No.11やNo.12, および右岸端のNo.15はNTI<1.5を示した. これは, 表面 波紋に乱れがある場合などが推察される.



(4) 流量の精度検証

a)流量の算出

標定点STIV法によって得られた15検査線の表面流速 は、表面浮子と同様に水深平均流速に変換するため、更 生係数0.85を乗じた.これらを出水後平成30年7月23日 に実施した横断測線(基準断面)をもとに15区分し、区 分求積法で算出した.

b)水位流量曲線での検証

流量観測精度の検証には、図-14に示す流量管理図 (H-√Q)を用いた.これより、算出されたピーク流量 は、既往の観測データから作成したH-Q式に線形で一義 的にプロットされた.

c)流水抵抗の分析による検証

UAVによる画像処理型流量を水理学的に検証するために、平成28年の空知川上流²⁾や工藤らの手法^{5)の}をもとに、平成30年7月3日の浮子と画像の計5回の観測流量を岸・黒木⁹⁾の流水抵抗の理論を用いて分析した. 無次元 掃流力 τ*と無次元有効掃流力 τ*'の関係は以下の式(1) で示される.

$$\tau \ast = \tau \ast + \tau \ast^{"} \tag{1}$$

これらはいずれも無次元数であるが、 τ^* , は無次元 掃流力のうち表面抵抗を、 τ^* ," は形状抵抗分を表して いる.式(1)は、小規模河床波が発達して形状抵抗が増加 すると、 τ^* "が増加して τ^* における τ^* ,の占める割 合が減少する関係にあることを示している. τ^* "を直 接算出するためには小規模河床波の波高及び波長を得る 必要がある一方で、 $\tau^* - \tau^*$,関係を分析することで小 規模河床波を直接計測せずに流水抵抗を調べることがで きる.ここで、 τ^* と τ^* ,は式(2)、(3)の通りである.

$$\tau *= \frac{RI}{sd} \tag{2}$$

$$\tau *' = \frac{R'I}{sd} \tag{3}$$

ここで、R: 径深、I: 勾配, s: 河床砂の水中比重 (1.65), d: 河床砂の平均粒径, $R': \tau^*$, に対する径 深である.河床砂の平均粒径(d)は, 平成28年の河床材料 調査結果(Kp130)より,中央粒径d50の左岸・河道部 の平均値(26mm=0.026m)を用いた.なお,右岸は細 粒成分(d50=0.1mm)で代表性がないとして省いた. 勾配(I)は実測値が流速の遅い高水敷上の河岸で測定 しているため,低水時より緩く,流水断面を代表してい ないと判断したため,低水流量観測時の平均値0.0011を 一律与えた.図-15に7月3日の浮子流量4回とUAV画像 流量1回の実測値から, $\tau^* - \tau^*$, の関係をプロットし た. τ^* は(2)式より, τ^* は(4)式からニュートン 法により算出したR'を(3)式に代入して求めた.





表-2 相当粗度Ksに係るm値

No	地点名	10%粒 径(mm)	60%粒 径(mm)	均等係 数 (d60/d10)	同定さ れたmの 値
1	信濃川/臼井橋地点	0.3	0.6	2	0.5
2	千代田実験水路	2.5	20	8	0.8
3	姫川/山本地点	2	100	50	4
4	石狩川/納内	1	37	37	3



すべてDune I のライン上に位置しており,河床波の大きな変動 (Transition) は無かったと推察されるため,水位Hと流量Qの関係は一義的に成立することが検証できた.一方で,式(2)より得られた無次元掃流力 τ *(=0.136)を,図-15のDune I のラインから読み取ると τ *'(=0.078)となり,式(3)よりR'(=4.78)が算出される.次に流速の対数分布則を式(4)に示す.

$$\frac{u}{\sqrt{gR'I}}$$
=6.0+2.5 $\ln\left(\frac{R'}{ks}\right)$

これらを式(4)に代入すると平均流速 u (=2.82)が求めら れる.ここで断面積を乗じると流量は3,194.97m³/secとな り、UAV画像流量3,188.55 m³/secと0.2%の差で一致した ことから、UAV画像流量が適用可能であることを検証 できた.

5. 大規模出水に対応した安全・確実な流量観測

(1) 大規模出水時のUAVの優位性

大規模出水時にUAVによる画像処理型流量が優位な 理由は,離れた場所からエントリーが可能なことである. UAVは1回のフライトで20分程度,連続飛行が可能であ る.これは距離にすると往復2km程度の飛行距離になる ため,出水時に安全な場所からUAVを離陸させ,目的 地まで飛行させるには十分な性能であると推察される. これは安全性・確実性に寄与する.また,近年,災害発 生時には状況把握のためUAVが多く使われるように なった.こうした作業に併せて,UAVを空中でホバリ ング静止させて動画像を30秒程度取得できれば,災害時 の河川流量の把握が効率的に取得可能である.これは効 率性やコスト縮減につながると評価できる.

(2) 大規模出水時のUAVの留意点

留意点としては、強風時や雨天時、夜間など劣悪な条件下で安全・確実な観測が可能かである。本研究で使用したUAVは耐風性・防水性において、これらに準ずる性能があるが、今後大規模出水時に想定される劣悪な条件下でも対応可能なUAVが必須になると推察される。また、夜間適用については、UAVに搭載可能な遠赤外線カメラ等があり、光量の少ない箇所での夜間観測が可能になっている。しかし、実河川での事例が少ないため、今後、出水に備えた検証を継続していく所存である。

6. まとめ

- 石狩川納内で計画規模の大規模出水が発生し、橋 が危険のため通行止めになり、水位ピーク時の浮 子による流量観測が不可能になったが、UAVを用 いたSTIV画像解析によってピーク流量を算出した.
- 左右岸に標定点として構造物等を入れた斜め画像 を撮ることで、川幅の広い河川でも高度を上げず に解析可能な画像を取得することができる。
- UAVによる動画像は地上カメラに比べて俯角が大きく確保できるため、観測精度が向上する.
- UAVによる画像処理型流量は、 τ*-τ*'の関係から算出した流量と合致しており、水理学的にも適用可能と検証された.
- UAVは1回で約2km往復が可能なため、災害時で も安全な場所から対応可能である.通行規制が あっても、確実に現場に到達できることから、災 害時の劣悪な条件下で機能する可能性が高い.

参考文献

(4)

- 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.
- 2) 佐々木靖博・佐藤匡・平垣貴俊:平成28年台風10号空知川 上流における画像処理型流量観測の適用性-大規模出水に対応した流量観測高度化(その2)-,平成29年度国土交通省国土 技術研究会論文集,2017.
- 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_634, 2015.
- 4) 能登谷祐一・藤田一郎・建口沙彩:ナビゲーションモード に対応した空中撮影動画のブレ補正と洪水流計測への適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.72, No.4, I_877-I_882, 2016.
- 5) 工藤俊・萬矢敦啓・小関博司・笛田俊治・中津川誠:洪水 中の河床変動を考慮した流量の推定,土木学会論文集G(環境) Vol.72, No.5, I_313-I_320, 2016.
- 6) 工藤俊・萬矢敦啓・小関博司・笛田俊治・中津川誠: 実河 川における流水抵抗の分析,土木学会論文集B1(水工学) Vol.73, No.4, I_769-I_774, 2017.
- 7)藤田一郎・北田真規・霜野充・橘田隆史・萬矢敦啓・本永 良樹:複数アングルの画像計測とラジコンボート搭載型 ADCP による融雪洪水流の空間計測,土木学会論文集B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_613-I_618, 2014.
- 8) 能登谷祐一・藤田一郎・建口沙彩:河川表面流画像計測 STIV における新手法とSTI 画質評価法の開発,土木学会論 文集B1(水工学) Vol.73, No.4, I_505-I_510, 2017.
- 9) 岸力・黒木幹男:移動床流れにおける河床形状と流体抵抗
 (I),北海道大学工学部研究報告, pp.1-23, 1972.
- 10) 芦田和男:河道の設計法(4) -河川の粗度について-,土木 技術資料,1-7,1959.

(2019.4.2受付)