

平成30年度

平成30年7月豪雨の状況とUAV空撮による 画像処理型流量観測の適用性 —大規模出水に対応した安全で確実な流量観測を目指して—

札幌開発建設部 河川計画課 ○平村 晃基
太田 陽子
渡邊 一靖

平成30年7月豪雨では、7月2日から5日までの合計雨量が、平年の7月の月降水量の2倍程度となる記録的な大雨となった。石狩川納内水位観測所では氾濫危険水位を超過し、観測所近傍の橋梁が通行止めになるなど浮子による流量観測が困難になったことからUAVを用いた空撮を行い、その空撮画像から画像解析手法（STIV法）を用いて流量を算出し、大規模出水時の安全で確実な非接触型観測手法としての適用性を検証した。

キーワード：画像処理型流量観測、大規模出水、UAV、空撮

1. はじめに

洪水時の流量観測は明治24年から100年以上にわたって浮子観測を基本に実施されてきた。浮子観測は観測員が橋等から浮子を投下し、下流に配置した観測員が、第1見通と第2見通の通過時間を測定する手法で、単純かつ比較的短時間で観測が可能なることから、長年にわたって採用されてきた。しかし、大規模出水時には、橋や堤防に近づくことが危険な状態となり浮子観測を実施できなかったり、道路の冠水等による通行規制により、観測所に辿り着くことができない等の課題も見えてきた。近年、北海道では時間雨量30mmを超える短時間雨量が約30年前に比べて約1.9倍に増加しており、気候変動の影響による豪雨の頻発化、激甚化が顕在化している¹⁾。本研究では、浮子観測が不可能な状況下でも活用できるUAVを用いた空撮からの流量観測手法の適用性を検証し提案するものである。

2. 平成30年7月豪雨の概要

(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。図-1に気象庁のアメダス積算降水量を示す。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-2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日からの大雨により、札幌開発建設部管内の水位観測所では、計画高水位超過1箇所、氾濫危険水位超過3箇所、避難判断水位超過3箇所、氾濫注意水位超過16箇所、水防団待機水位超過12箇所を記録した。石狩川納内観測所では、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。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、水位は徐々に低下し、7月5日22時には水防団待機水位を下回った。（図-2）

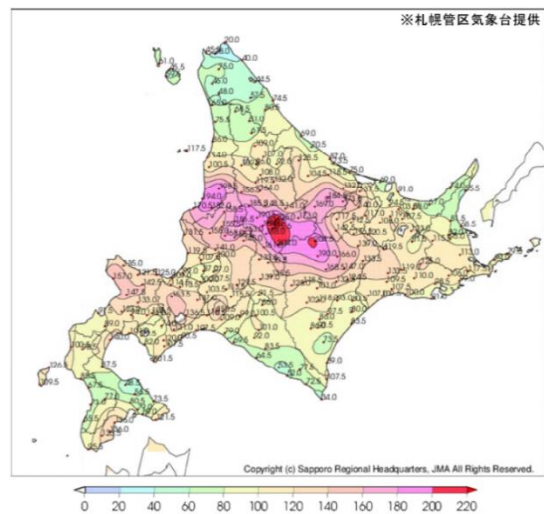


図-1 アメダス積算降水量分布
(平成30年7月2日～7月5日)

(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。（図4）

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) 観測機材と設定条件

カメラは拡張ISO高感度カメラで、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に設定した。

b) 観測方法

納内橋右岸下流側に、図-5のようにカメラを三脚で設置、固定し、20秒以上の動画撮影を行った。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。（図-6）

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-7に示すような流下方向の検査線を15本設定した。今回の出水では水面幅が200m程度となり、平常時の2倍以上に広がった。ま

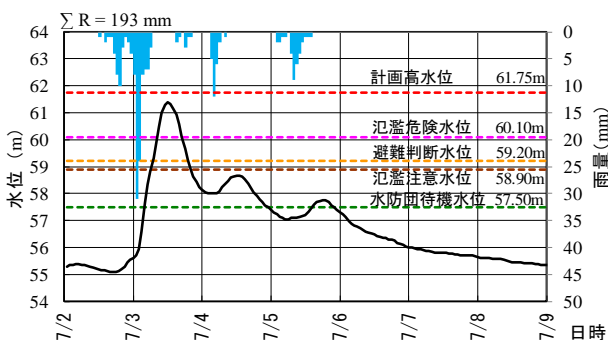


図-2 降水量（音江観測所）と水位（石狩川納内観測所）

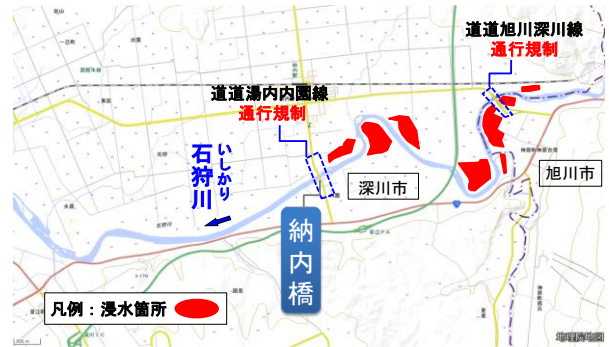


図-3 浸水状況（石狩川納内周辺）



図-4 納内橋の通行止め（平成30年7月3日11時）



図-5 地上カメラによる観測（平成30年7月3日12時）



図-6 地上カメラによる標定点

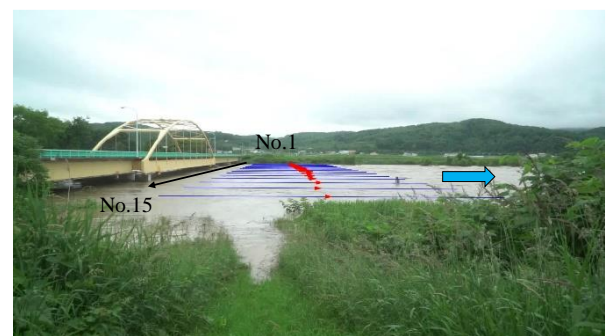


図-7 検査線と流速ベクトル（地上カメラ）

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²⁾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-8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) 観測機材と設定条件

使用したUAVは、図-9に示す4枚羽のクアッドコプターで、カメラは1インチセンサーを搭載した機材を用い、画像解像度は1920×1080、フレームレートは30fpsに設定した。また、撮影時のブレ防止対策として精度が±0.01°のカメラジンバルを装着した。

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-10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、画面内に看板、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秒間の動画撮影を行った。

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-11)

c) 時空間画像からパターン勾配の作成

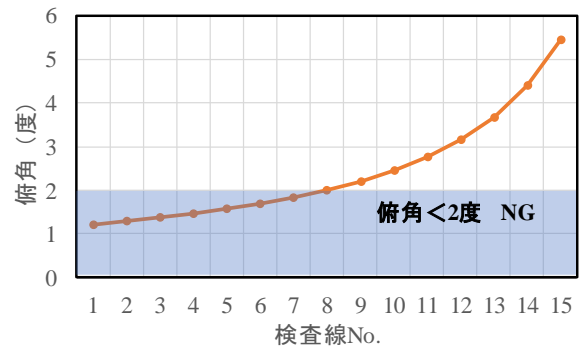


図-8 検査線とカメラ俯角(地上カメラ)



図-9 使用したUAV

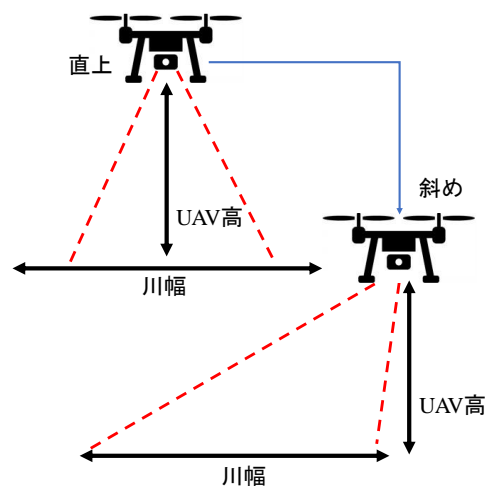


図-10 UAVによる観測方法

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

(国土交通省河川砂防基準調査編より)

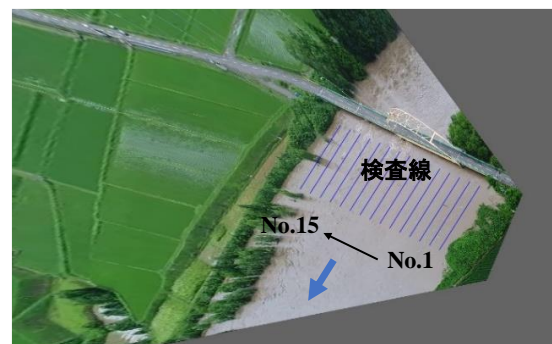


図-11 幾何補正(オルソ化)と検査線設定(UAVカメラ)

STIV法では、図-12に示す時空間画像（STI）が作成される。これは水面波紋の軌跡を示しており、明瞭な斜めパターン勾配が得られている。縦軸が時間、横軸が検査線の距離であることから、この斜めパターン勾配が流速となる。

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-13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-14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) 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日に実施した基準断面の横断測量結果をもとに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-15に示す流量管理図（ $H-\sqrt{Q}$ 図）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⁵⁾や工藤らの手法^{6) 7) 8)}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。

図-16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。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、無次元掃流力 τ_*' から算出した流量は

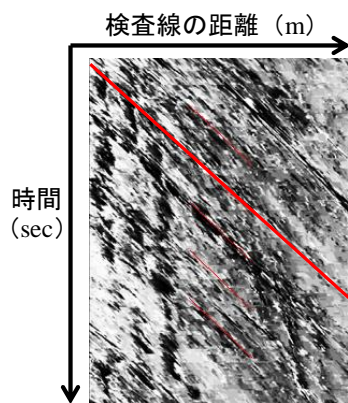


図-12 時空間画像からの流速算出 (No.8測線)

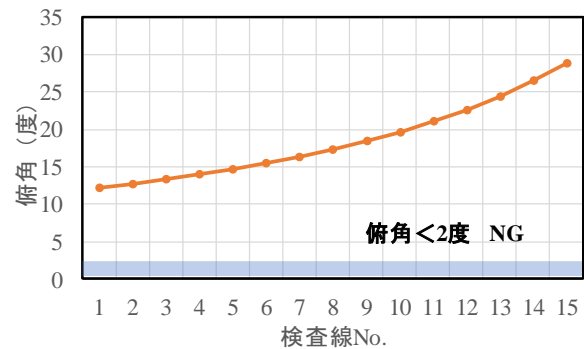


図-13 検査線とカメラ俯角 (UAVカメラ)

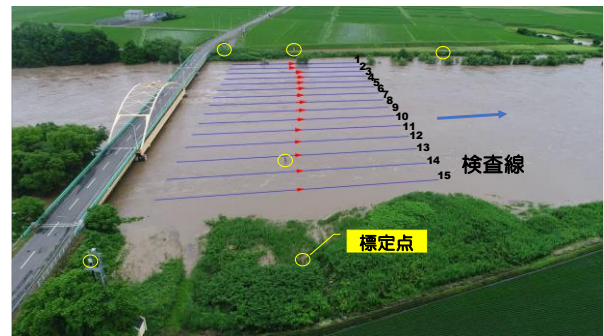


図-14 検査線と流速ベクトル (UAVカメラ)

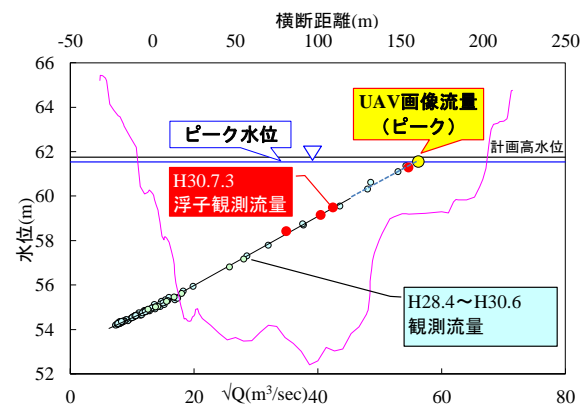


図-15 H- \sqrt{Q} 図 (流量管理図)

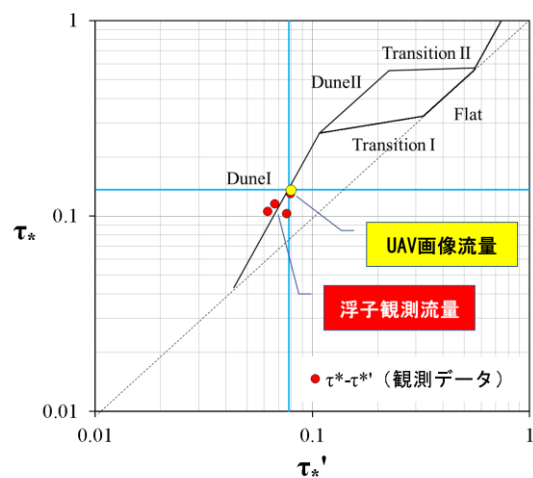


図-16 流水抵抗 $\tau_* - \tau_*'$ の関係

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観測が優位な理由は、離れた場所から調査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 2 km 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を 30 秒程度取得できれば、災害時の河川流量の状況が効率的に把握できる。これは効率性やコスト縮減につながる。

(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。国土交通省の革新的河川管理プロジェクト第一弾では、天候の完全回復を待たずに強風下でも状況把握可能な全天候型ドローンの開発が始まっている。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を有していたが、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、本研究の事例は昼間における観測だったが、夜間に観測が必要な場合も想定される。技術的には UAV に搭載可能な遠赤外線カメラ等により光量の少ない箇所でも画像解析に使用できる動画の撮影が可能になっているが、実河川での事例が少ないため、実河川での観測及び検証が今後必要である。

6. まとめ

- 平成30年7月豪雨では、石狩川納内観測所において納内橋が通行止めになり、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。
- UAVによって、左右岸に標定として構造物等を入れた斜め画像を撮影することで、川幅の広い河川でも高度を上げずに解析に資する画像を取得することができた。

- UAVによる動画は地上カメラに比べて俯角が大きく確保できるため、観測精度の向上に寄与することがわかった。
- UAVによる画像処理型流量は、水位Hと流量 \sqrt{Q} の関係式上にプロットされた。また、流水抵抗の分析により、河床波の大きな変動が無いと評価されたことから、水位と流量の一義的な関係が成立し、画像処理型流量の妥当性が確認できた。
- UAVによる画像処理型流量は、 $\tau^*-\tau^*$ 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回のフライトで約2km往復が可能のため、災害時でも安全な場所から対応できる。また、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。
- 夜間適用が今後の課題で、遠赤外線カメラ等を搭載したUAVでの実証試験が必要である。

参考文献

- 1) 山田朋人：北海道地方における気候変動予測，日蘭治水セミナーin北海道，2018.
- 2) 藤田一郎・北田真規・霜野充・橋田隆史・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.
- 3) 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・建口沙彰：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.
- 5) 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.
- 6) 工藤俊・萬矢敦啓・小関博司・岩見洋一：現場のための新しい水位-流量関係の構築に向けた基礎研究，河川流量観測の新時代，第 5 巻，pp14-21, 2015.
- 7) 工藤俊・萬矢敦啓・小関博司・笹田俊治・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.
- 8) 工藤俊・萬矢敦啓・小関博司・笹田俊治・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.
- 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.