

ドローンを用いた広域的な流速・水位計測技術の開発

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 31～令 3

担当チーム：河道監視・水文チーム

研究担当者：山本晶，萬矢敦啓

【要旨】

近年のドローン技術と画像や電波技術を活用した非接触型計測技術の発展が著しい。これらを組み合わせることによって河川計測の多様性が広がり、あたかも水理実験で計測するような計測結果を得ることが期待される。本チームはドローンに非接触型の計測機能を搭載し、流速及び水位の計測機能を持たせることに成功し、準実スケール実験水路である千代田実験水路において堤防破堤時の破堤流量の計測を試みた。本報告ではそれらの結果の一部を紹介する。

キーワード：非接触型流速計，流速・水位計測，電波式，ドローン，移動床

1. はじめに

近年のデジタルデータを用いた技術発展により、河川における水位や流速を非接触型計測機器で計測することが可能となってきた¹⁾²⁾。これらは他の産業界における技術を河川計測に採用している場合が多いが、特に画像による顔認識、画像やレーザーを用いた自動運転等が既往の新技术を高精度化することに大きく貢献しているように思える。また土木技術においても SfM (Structure from Motion) を活用した測量技術の発展は目覚ましく、この技術を採用することで河川の水面形状の計測も試みられている⁴⁾。

河川計測において非接触型機器を採用することの利点は、現在の水文観測の課題を解決するという観点以外にも、多くの可能性を持っていると考える。現況の水位計測の課題は、水位計の破損、水位計近傍の土砂堆積による計測の停止等が考えられる。また現況の流量観測（すなわち流速観測）の課題は、作業員の確保、作業員の安全性等である。一方、既往の水文観測の範疇を超えた今後の可能性の一つに、任意地点における流速場の観測や水面形状の把握が挙げられる。例えば堤防が破堤した後の継続した流れの把握や、洪水時の堤防近傍における危険個所の把握がある。このような必要性は特に近年の大規模出水で顕在化してきたように思える。また市販の UAV の技術革新も同様に計測技術の発展に影響を及ぼしてきた。積載量の増加、航行継続時間の延長、雨天時における安全な航行がこれにあたる。UAV を計測機器のプラットフォームとして採用することで計測に対する適用範囲が拡大することが期待される。このような背景を基に、河道監視・水

文チームは河川水の流れ場、水面形のモニタリング手法の開発とその適用法に関して検討を進めてきた。本報告では特に電波技術を用いた流量推定手法の開発を概説する。

本チームは YDK テクノロジーズ社（旧横河電子機器）と共同研究を締結し Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) レーダ方式の電波式流速・水位計の開発を行ってきた⁵⁾。このレーダ方式によって、対象物の移動速度とそこまでの距離の計測が可能になっている。つまり、水表面流速と水位を同時に計測できることを意味する。これまで姫川山本観測所にそれを一基設置し、様々な天候を経験しながら一年以上継続して計測を行った。その経験を基に、本研究では前述の電波式流速・水位計を小型化し、UAV（ドローン）に搭載して計測を行った。

現地計測は十勝川の千代田実験水路における破堤実験を利用し行われ、人工的に作成された破堤部から氾濫原に流出する流量の計測を行った。UAV には電波式流速・水位計の他に、流向と水面波波長を計測するためにビデオカメラを搭載した。破堤中の流量を計測するためには、破堤幅が時々刻々変化する中、水深を推定する必要があるため、流速や水面波波長と水深の関係を議論した既往の研究を参考にし、水深・流量の推定を行った。

2. 計測機器

2.1 機器構成

機体を二種類用いており、一つは DJI 社製の MATRICE 200、もう一つは株式会社自立制御システム

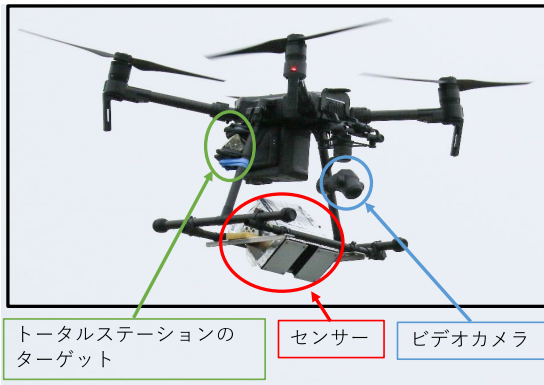


図-1 機器構成

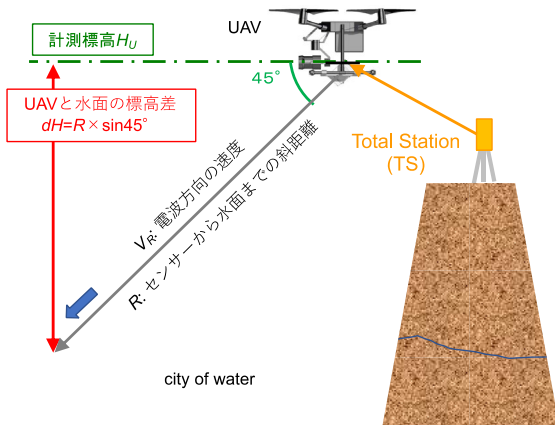


図-2 計測体制

研究所製の ASCL-PF1 である。前者の積載量は 1.67 kg で、後者は 3 kg である。図-1 に示すように、UAV にセンサー、ビデオカメラ、トータルステーション (TS) のプリズムを取り付けた。センサーの重量は約 940 g (バッテリー、伝送装置含む) である。取得されたデータは Zigbee を介して陸上のパソコンに伝送され、流速値や斜距離が計算される。UAV の位置は自動追尾機能を有する TS によって計測される。カメラは MATRICE200 に Zenmuse X4S が、ASCL-PF1 に Xacti 社製の FPV 用電子ジンバルカメラが取り付けられており、センサーと共に俯角 45 度で固定されている。

2.2 計測原理

センサーは周波数 24.05~24.25 GHz を利用している。距離に応じて二つの周波数 f_1, f_2 が選択され、次式を用いて斜距離 R が算定される。

$$R = \frac{(\theta_1 - \theta_2) \cdot C}{4\pi(f_2 - f_1)} \quad (1)$$

ここに、 C は光速、 θ_1 と θ_2 は各周波数の位相である。

斜距離方向の速度 V_R は選択された周波数のうち一つ f_i を用いて次式より算定される。



図-3 観測区間の平面図

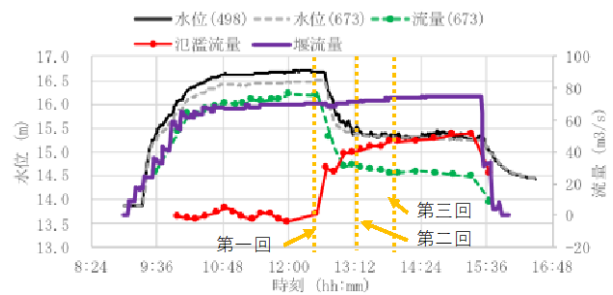


図-4 水位・流量の時系列変化と観測時刻

$$V_R = \frac{f_{di} \cdot C}{2f_i} \quad (2)$$

ここに、 f_{di} は f_i におけるドップラー信号である。

図-2 に示すように、上記で算出された値と俯角、TS の計測値より水位 H 、表面流速 V を算定する。詳細な原理は参考文献を参照されたい。

3. 観測条件

3.1 千代田実験水路の概要

千代田実験水路は延長 1,300 m、堤間距離 15 m、平均河床勾配は 1/500 である。流量は上流側の堰で操作されている。図-3 に水路の平面写真を示す。写真下側が本川で、上側が氾濫原である。氾濫原は平坦地形である。図中の数字は前述の堰からの距離を示しており、流向は図右から左である。図中の点 A、B の間において土が露出され、点 C に人工的に切り欠きが作成されているため、氾濫初期は図-3 のように越流の発生と共に濁水が氾濫している。また、点 A より下流側と点 B より上流側にブロック護岸が張られており、侵食されないように施工されている。

3.2 流速場

図-4 に水路内の水位と流量の時間変化を示す。左縦軸に水位、右縦軸に流量を示している。流量は 2 箇所計測され、上流に位置する堰 (堰流量) と破堤部より下流側の ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 観測流量 (流量 (673)) である。これらの数字は図-3 と同

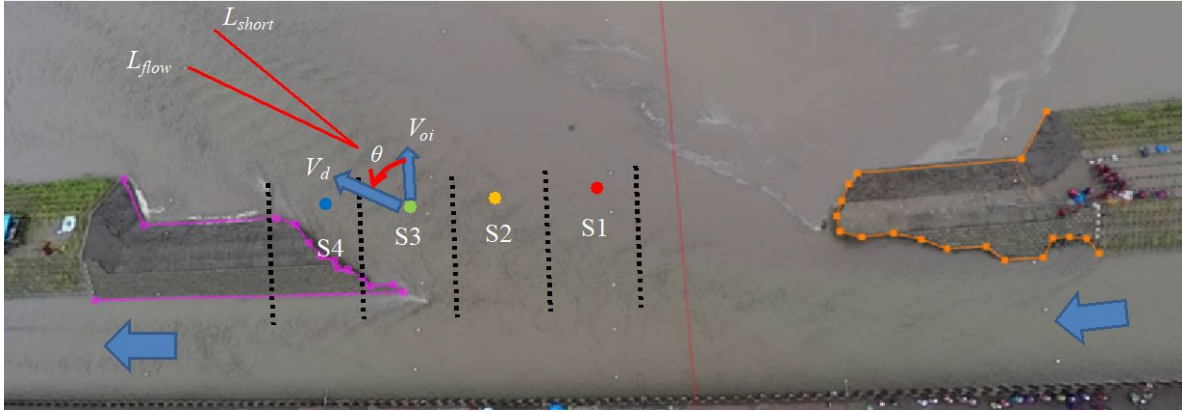


図-5 第三回観測における照射位置(S#), と区分線 (破線), 計測位置

様に堰からの距離を示す。また、堰流量から流量 (673) を引いた値を氾濫流量として示している。水位計は破堤区間より上流 (水位 (498)) と下流 (水位 (673)) で一箇所ずつ設置されている。12 時 30 分頃から流量 (673) が減少し始めており、破堤幅の拡大を示している。その後、氾濫流量は急激に増加し、13 時頃から増加が緩やかになり始めている。これは破堤幅が平衡状態に近いことを示唆している。本手法による計測は 3 回行われ、第一回が 12 時 44 分、第二回は 13 時 29 分、第三回は 14 時 11 分であり、図-4 に黄線で示している。一回の観測に要する時間は、一つの区分断面につき 1 分間計測を行い、離陸から着陸まで約 10 分かかっている。

4. 流量推定法

4.1 流量値の定義

流量を堤防線に垂直な方向と定義して次式で示す。

$$Q = \sum q_i = \sum \alpha_i \cdot V_{oi} \cdot h_i \cdot B_i \quad (3)$$

ここに、 Q は総流量、 q_i は区分流量、 α_i は更正係数、 h_i は水深、 i は区分番号である。

ここで、区分断面の決定方法について説明するために図-5 に第三回観測における破堤中の流況を示す。図-3 と比べて堤防の形状やその周りの流況が全く異なる事が分かる。この観測における照射位置を S# で示している。観測位置は破堤幅や流況に応じて決定されており、例えば図-5 中の S1 より上流側は死水域だったことが UAV のカメラで分かったため、計測が行われていない。尚、各区分断面における茶色と黒の縞模様が水面波を表している。

後述する水深推定法では、水面波の波長 L と流れ方向の流速 V_d が必要となる。前述の流量の定義を基に、センサーやカメラが堤防線に対して垂直に向くように

UAV の向きを調整している。従って、 L や V_d を算定するために、流向 θ が必要となる。水面波は河床波とその上の流れにより発生するため、流向方向の峰 2 点の位置によって流向を算定した。つまり、図-5 の L_{short} のような峰間の最短距離方向ではなく、 L_{flow} で示すような流向方向を意味する。ここで算定された流向 θ とセンサー方向流速 V_{oi} を用いて、流向方向の流速 V_d は次のように表される。

$$V_d = V_{oi} / \cos \theta \quad (4)$$

尚、流向の算定において、UAV のコンパスによる方向角を考慮している。

更正係数に関して、表面浮子に対しては 0.85 が用いられる⁶⁾。一方、今回の観測結果では砂堆スケールの河床波由来と見られる水面波の発生が確認されているため、この値は変化する。例えば、橋田ら⁷⁾は砂堆上のトラフからクレストにかけて更正係数が 0.75 から 1.0 まで変化することを確認している。一方、反砂堆上における更正係数は 1.0 となる可能性が高い。本観測では氾濫流における流況の予測が難しいため、一般的な 0.85 を採用した。

4.2 水深推定法

水深を推定するために、山田ら⁸⁾と Yalin & Bishop⁹⁾の成果を参考にした。山田ら⁸⁾は微小振幅波理論を基礎に、不規則河床波上の水面波の波数とフルード数を関連付ける式 (5) を導出した。また、実験結果と比較して、適用可能なフルード数が 0.6 以下であることを示した。

$$Fr^2 = \frac{1}{k_0 h} \tanh(k_0 h) \quad (5)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{L}, \quad Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$$

ここに、 L は波長、 U は平均流速、 h は水深、 g は重力

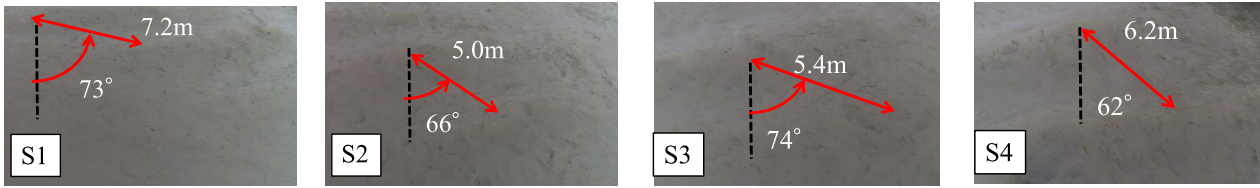


図-6 水位・流量の時系列変化と観測時刻

加速度である。 U は流向方向の平均流速であるため、次式で表される。

$$U = V_d \cdot \alpha_i \quad (6)$$

一方、Yalin & Bishop⁹⁾は砂堆の発達時間に関する研究において、実験結果を再現する波長水深比が次式で表されることを確認した。

$$L = 2\pi \cdot h \quad (7)$$

5. 計測結果

5.1 流速と波長の比較

図-6 に第三回観測の各区分における動画を時間合成した画像を示している。この画像は 60fps の動画 5 秒間、計 300 フレームから 20 フレーム間隔で合計約 15 フレームの重ね合わせの結果である。画像の俯角 45 度に加え、カメラの光学特性と映像、斜距離 R を STIV(space-time image velocimetry)解析ソフトに入力し、各ピクセルに空間座標を与えた後に水面波の峰を選択している。各図中の赤い矢印の先が選択した峰を、傍の数字が波長を示している。また、赤い弧と数字の組み合わせは θ を示している。著者らは、映像に現れた水面波は河床波によって生じたものと考え、算定された水面波の波長と河床波の波長は一致すると仮定した。

5.2 観測結果の比較

図-7 に三回分の観測結果を示す。(a#) は堤防形状と電波の照射位置、(b#) は堤防線沿いの地形と計測結果を示しており、どちらも横軸を下流からの距離としている。地形においては、初期河床形状として堤防天端高さ、それと同じ測線上の出水後河床高(河床高 1)、照射位置上の出水後河床高(河床高 2)を示している。また、計測結果として、計測水位、推定河床高、区分流速を示した。推定河床高は推定流量が図-4 の氾濫流量に最も近い値を示した式(7)の結果を示している。

図-7(a1)における破堤幅は他の観測と比べて狭く、流況は段落ち流れになっていたため、水深推定式を用いることが難しい。そのような流況においても流速と水位の計測は可能であるため、その結果を(b1)に示し

た。

図-7(a2)と図-7(a3)の堤防形状はほとんど変化がなく、平衡状態に達したことが示唆される。この結果は図-4 における氾濫流量の変化と比べても妥当である。

第二回観測の流速分布(図-7(b2))は S1 において遅く 0.5 m/s 以下となり、S5 において最も速く 1.0 m/s を超えている。一方、第三回観測の流速分布(図-7(b3))は、前述の第二回(図-7(b2))ほどの流速差はみられず、1.0~1.5 m/s の間に分布している。水位分布においては、第二回と第三回共に距離 20 m から 50 m にかけて水位が低下する傾向を計測している。この傾向の原因は図-5 より、破堤部における流れが下流側に寄ったためと考えられる。

推定河床高については、第二回の S2、第三回の S1 において出水後河床高よりも低く推定されている。それ以外の区分の河床高は計測位置における出水後河床高と近い値を示している。

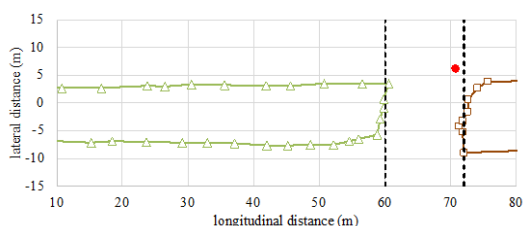
5.3 流量値の比較

表-1 は計測結果と各方法で推定された流量を示している。表の上段はセンサーや PIV(Particle Image Velocimetry)解析によって得られた値を示している。表中の氾濫流量は図-4 から得た値である。下段は各区分の推定水深と流量、総流量を示している。

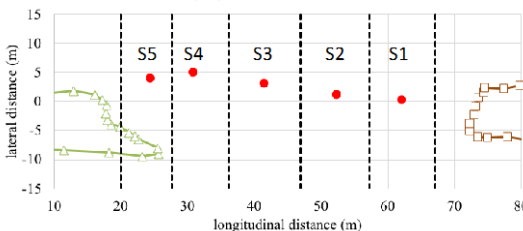
区分流速は 9 区分中 5 区分において、PIV と 10% 以内の差の流速を示している。他 4 区分においては PIV と比べて倍半分の流速を示している。これらの差は、計測原理による違いと流況が関係していると考えられる。つまり、センサーは水表面の波立ちの移動速度、一方の PIV は水表面のトレーサーの移動速度を計測している。破堤部においては流れが複雑になるため、それぞれの方向が異なる可能性がある。この可能性に対して今後、ADCP を用いた比較観測により検証していきたい。

流向は、どの区分においても PIV と同じ流向を示している。一方、波長は第三回の第 4 区分を除いて、PIV の結果と 50 cm 以上の差がある。本来流向の結果が良ければ波長の結果も良いと考えられるが、そうではなかった。これらの分析では水面を平坦と仮定した。また、動画の俯角が 45 度であるため、水面波の峰の詳細

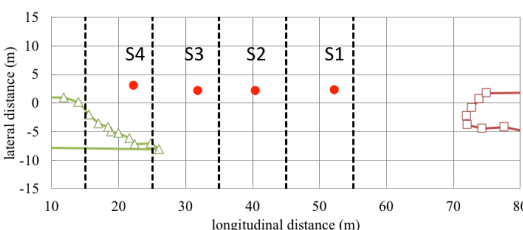
□ 堤防形状 (上流) △ 堤防形状 (下流) ● 照射位置



(a1) 第一回観測

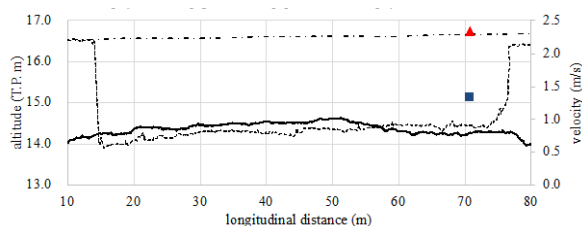


(a2) 第二回観測

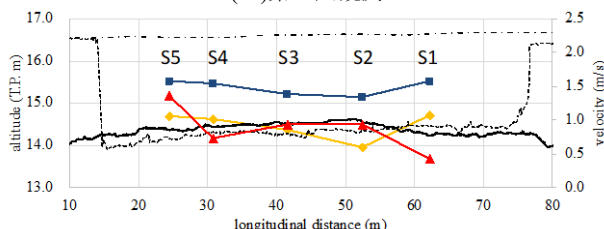


(a3) 第三回観測

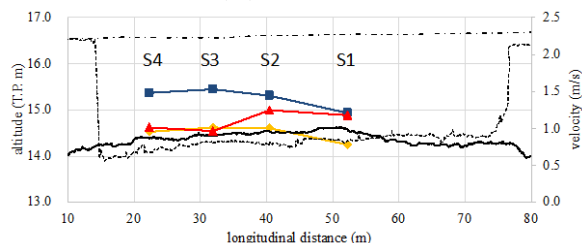
--- 天端 ■ 計測水位 ◆ 推定河床高
 --- 河床高1(出水後) — 河床高2(出水後) ▲ 区分流速



(b1) 第一回観測



(b2) 第二回観測



(b3) 第三回観測

図-7 全観測における堤防形状と照射位置(a#), 計測流速・計測水位・推定河床高

表-1 計測結果と推定流量値

| 観測番号 | | 1 | 2 | | | | | 3 | | | |
|-------------------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|
| 区分番号 | | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 区分流速 V_{oi} (m/s) | UAV+ 電波 | - | 0.43 | 0.94 | 0.94 | 0.73 | 1.36 | 1.18 | 1.24 | 0.97 | 1.01 |
| | PIV | - | 0.32 | 0.53 | 1.19 | 1.42 | 1.23 | 0.50 | 1.24 | 1.14 | 1.84 |
| 流向 θ (度) | UAV+ 電波 | - | 71 | 70.2 | 65.4 | 64.3 | 63.4 | 72.6 | 65.6 | 74.3 | 61.8 |
| | PIV | - | 53.8 | 70.1 | 60.8 | 60.9 | 61.8 | 67.4 | 64 | 68.2 | 59.7 |
| 波長 L (m) | UAV+ 電波 | - | 5.11 | 7.49 | 5.31 | 5.38 | 5.27 | 7.23 | 4.96 | 5.44 | 6.23 |
| | PIV | - | 1.55 | 3.44 | 3.82 | 3.71 | 4.63 | 4.84 | 3.81 | 4.72 | 6.03 |
| 流速 V_d (m/s) | UAV+ 電波 | - | 1.32 | 2.79 | 2.26 | 1.69 | 3.03 | 3.95 | 3.01 | 3.58 | 2.14 |
| | PIV | - | 0.54 | 1.56 | 2.44 | 2.93 | 2.60 | 1.31 | 2.84 | 3.08 | 3.66 |
| 区分幅 (m) | | 10 | 7.27 | 8.46 | 10.43 | 10.60 | 10.14 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 計測水位 (m) | | 15.12 | 15.52 | 15.15 | 15.22 | 15.47 | 15.53 | 14.94 | 15.31 | 15.45 | 15.37 |
| 氾濫流量 (m ³ /s) | | 29.9 | 43.5 | | | | | 47.2 | | | |
| 山田ら (1984)式 (5) | h_i (m) | - | 0.13 | 0.62 | 0.40 | 0.21 | 0.94 | NAN | 0.98 | NAN | 0.35 |
| | q_i (m ³ /s) | - | 0.34 | 4.22 | 3.36 | 1.41 | 10.99 | NAN | 10.42 | NAN | 3.02 |
| | Q (m ³ /s) | - | 20.3 | | | | | 13.4(NAN 以外の合計) | | | |
| Yalin & Bishop (1977)式 (7) | h_i (m) | - | 0.81 | 1.19 | 0.84 | 0.86 | 0.84 | 1.15 | 0.79 | 0.87 | 0.99 |
| | q_i (m ³ /s) | - | 2.16 | 8.06 | 7.04 | 5.63 | 9.83 | 11.54 | 8.35 | 7.12 | 8.52 |
| | Q (m ³ /s) | - | 32.7 | | | | | 35.5 | | | |

な平面位置の特定は難しい。従って、この分析のために高度を上げて俯角を大きくした動画撮影に専念することが望ましい。

氾濫流量は第一回で 29.9 m³/s, 第二回で 43.5 m³/s, 第三回で 47.2 m³/s であった。これらの値は堰流量と ADCP 観測流量の差分であるため、信頼度の高いデータである。式 (5) による流量は第二回におい氾濫流量の半分程度であり、第三回においては流速値が大きいため水深を算定できない区分があった。式 (8) による結果のみが第二, 三回いずれの観測においても氾濫流量と同じ規模の流量を算定した。これらの流量の結果は、各式で推定された水深ではなく、流向や波長の算定結果や更正係数の選択等の影響を大きく受けている可能性もある。

6. まとめ

本研究をまとめると、次のとおりである。

- 1) ドローンを用いた河床変動が活発な流況における流量観測手法を開発した。流量観測の要素は 2 つで、一つは水表面の流況計測、もう一つは土砂水理学の知見を用いた水深推定である。水表面の流況計測において計測された項目は、流速、水位、河床波由来の水面波の波長である。これらは電波技術と画像解析を組み合わせて行われた。
- 2) 計測は破堤中の河床変動が活発な流況に対して行われており、時々刻々破堤幅や水深が変化する流況であった。
- 3) 水深推定において、2 つの式による水深が比較された。式(7)による結果が最も真値に近かったが、それでも真値の 75%程度の値であった。この差の要因として、更正係数や流向、波長算定における不確実性等が考えられる。

7. 推奨される運用

観測後の分析より、本研究が提案する機器構成による流量観測は、表-2 の観測手順を推奨する。

前章で述べた通り、流量観測において水深推定が重要な要素である。また、適切な更正係数や水深推定法の選択は流量の不確実性を小さくする。そのために、水面波の縦断観測によるエネルギー勾配の把握は一つの手がかりとなる。例えば、図-5 における L_{flow} に沿って表面流速と水位を計測すると、エネルギー勾配の算定が可能になり、岸・黒木¹⁰⁾の方法を用いて水深を得ることができる。この方法は工藤ら¹¹⁾によって、ADCP と比較した検証が行われている。また、更正係数に関

表-2 計測手順

| 手順 | 内容 | 参考 |
|----|----------------------------------|-------------------|
| 1 | UAV による現状把握 | 図-3,5 |
| 2 | 区分断面位置の決定 | 図-5 |
| 3 | 各区分位置における流速 V_0 , 水位の計測, 動画の撮影 | 図-6 |
| 4 | 流れ方向におけるエネルギー勾配の計測 | 図-5 |
| 5 | 撮影動画を用いた水面波の波長と流向の算定 | 図-6 |
| 6 | 計測流速, 流向, 波長を用いた水深の推定 | 式(5), (7) |
| 6' | エネルギー勾配を用いた水深の推定 | 文献 ¹⁰⁾ |
| 7 | 流量値の算定 | 式(3) |

しては、更正係数が河床波上で縦断分布を持ち、峰では 1.0, 谷では 0.75 となることが橘田ら⁷⁾によって分かっているため、この成果を用いることが望ましい。

謝辞：北海道開発局帯広開発建設部には千代田実験水路における観測場所と PIV 解析の結果等様々な観測データを提供して頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A. : Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.36, No.3, pp.397-414.1998.
- 2) 山口高志, 新里邦生 : 電波流速計による洪水流量観測, 土木学会論文集, No.497, II-28, pp.41-50, 1994.
- 3) 藤田一郎 : 河川表面流速の画像計測ソフトウェア KU-STIV 開発の背景とその応用, 建設工学研究所論文報告集第57巻, pp.81-92, 2016
- 4) 安田晃昭, 萬矢敦啓, 小関博司, 安田浩保 : カメラ同期制御装置を用いた近接写真測量による水面形状の計測, 河川技術論文集, pp.213-218, 2019.
- 5) 萬矢敦啓, 埴原学, 工藤俊, 小関博司, 笹田俊治 : 電波式流速水位計の開発, 土木学会論文集G(環境), Vol.72, No.5, I305-I311, 2016.
- 6) 独立行政法人土木研究所編著 : 平成14年版 水文観測, 社団法人全日本建設技術協会, p.155,
- 7) 橘田隆史, 萬矢敦啓, 小関博司, 吉川世里子, 岡田将治, 工藤俊 : 流況河床高同時観測システムの構築と観測から得られた河床波の挙動, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.73, No.4, I_535-I_540, 2017.2.
- 8) 山田正, 池内正幸, 堀江良徳 : 不規則底面をもつ開水路流れに関する研究, 第28回水理講演会論文集, pp.149-155, 1984.

- 9) Yalin, M.S. and Bishop, C.T. : On the physical modeling of dunes, Proc. 17th Cong. IAHR, 1. 1977.
- 10) 岸力, 黒木幹男 : 移動床流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, 67, pp.1-23, 1973.
- 11) 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, pp.I313-I320, 2016.

DEVELOPMENT OF MEASUREMENT SYSTEM OF VELOCITY AND WATER SURFACE IN WIDE RANGE USING UAV

Research Period: FY2019-2021

Research Team: Flood and River Response Monitoring Team,
River Dynamics Management Group

Author: YAMAMOTO Akira
YOROZUYA Atsuhiko

Abstract: The methodology for monitoring the velocity and water surface elevation using a RADAR on a UAV was developed. As the test case, a flow through levee breach was selected. With mounting the RADAR as well as the video camera, velocities, water surface elevation, length of surface wave were measured at when levee breach occurs. One of the challenges was estimation of water depth, which changes as time goes as levee breach progress. With combining the information obtained by the UAV and knowledges from sediment hydraulics, estimation of the water depth was estimated and the flow rate was obtained.

Keywords: non-contact current meter, velocity/water-level measurement, RADAR, UAV