

UAV搭載型電波式流速・水位計を用いた 流量推定手法の提案

DEVELOPMENT OF STREAM FLOW MEASUREMENT AT ACTIVE LIVE-BED
CONDITION WITH RADAR TECHNIQUE EQUIPPED ON UAV

小関博司¹・萬矢敦啓²・山見英生³

Hiroshi KOSEKI, Atsuhiko YOROZUYA and Hideo YAMAMI

¹正会員 工修 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 Ph.D 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³非会員 横河電子機器株式会社 技術開発本部 本部長 (〒257-8502 神奈川県秦野市曾屋500)

The authors developed the methodology for monitoring the stream flow on the active live bed condition using a RADAR on a UAV. In this study, the authors applied it in order to monitor flow through levee breach, whose breaching change over time. The RADAR is the one which was developed and tested as fixed type by the authors using the Frequency Modulated Continuous Wave radar techniques. One of the next applications of this kind is mounting it on the UAV to widen the capability of the measurement. With mounting the RADAR as well as the video camera on the UAV, 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, the authors estimate the water depth and determine the flow rate.

Key Words : *non-contact current meter, velocity/water-level measurement, RADAR, UAV, active live bed condition*

1. はじめに

近年の技術発展により、画像流速計や電波式流速計の非接触型流速計が浮子に代わる流速計測法として注目されるようになってきた¹⁾²⁾。これらの流速計測法は様々な流況や気象条件において比較検証されている³⁾⁴⁾。画像流速計においては、藤田らが中心となり、技術開発が進められてきた⁵⁾⁶⁾⁷⁾。また佐藤らは、橋の通行止めによって浮子観測が不可能となった状況において、大規模出水中の河川とそこに戻る氾濫流に対して画像解析を実施し、表面流速を得た⁸⁾。これは、著者らが知る限り、氾濫流を非接触型流速計で計測した初めての事例である。一方、電波流速計においては、取付方法が多様で、可搬型や設置型で橋や堤防からの計測が可能である。また、画像流速計と比べて後解析の手間がないため短時間で流速値を得られる利点がある。市販のUAVの性能が向上し、積載量が増加した他、全天候時の飛行が可能になったことから、UAVに電波式流速計を搭載することも一つ

の選択肢となりつつある。

著者らは、これまで多周波CWレーダを用いた電波式流速・水位計の開発を行ってきた⁹⁾。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。著者らは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に搭載して計測を行った。

現地計測は千代田水路実験において行われた。この実験では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中、水深を推定する必要があるため、流速や水面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。また、それら推定値に対する精度検証を行った。



図-1 機器構成

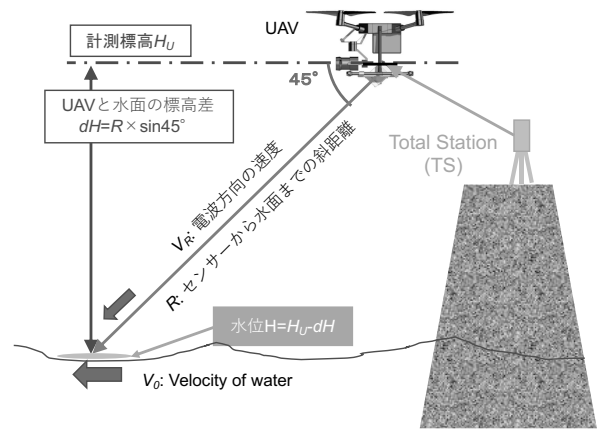


図-2 計測体制

2. 計測機器

(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。センサーの重量はバッテリーや伝送装置を含んでも940 g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) 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。

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

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

(1) 千代田実験水路の概要

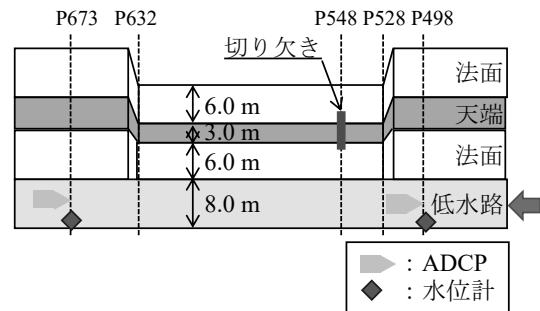


図-3 観測区間の平面図

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に水路の概略平面図を示す。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 (P####) 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P528とP632の間において土が露出され、P548に人工的に切り欠きが作成されている。また、P528より下流側とP632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。水路内の通水前の50%粒径 (D_{50}) は14.5 mm、堤体は二層構造で本体の D_{50} は9.37 mm、その表面に D_{50} が0.0064 mmの粘土層が厚さ0.5 mで覆っている。

計測流速や流向、波長の比較のために、Particle Image Velocimetry (PIV) 解析が実施された。カメラのアングルは後述の図-5が示すものと同様である。

(2) 流況

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観測流量 (流量 (673)) である。これらの数字は図-3と同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

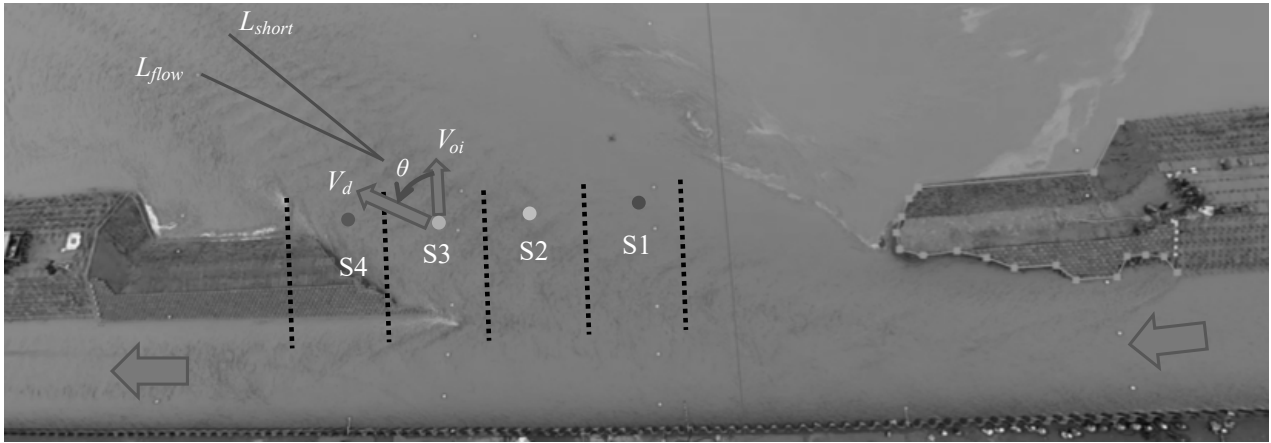


図-5 第三回観測における照射位置(S#)，と区分線(破線)，計測位置

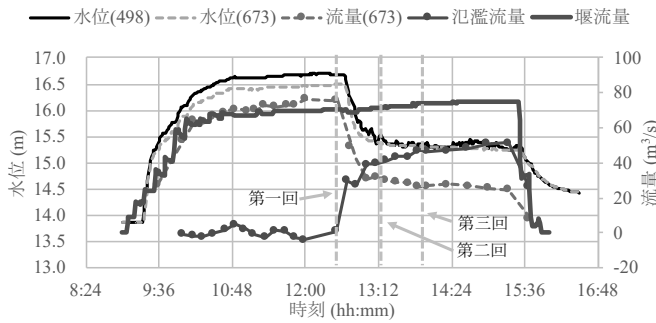


図-4 水位・流量の時系列変化と観測時刻

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

(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¹⁰⁾。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、橘田ら¹¹⁾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。

(3) 水深推定法

水深を推定するために、山田ら¹²⁾とYalin and Bishop¹³⁾の成果を参考にした。山田ら¹²⁾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。

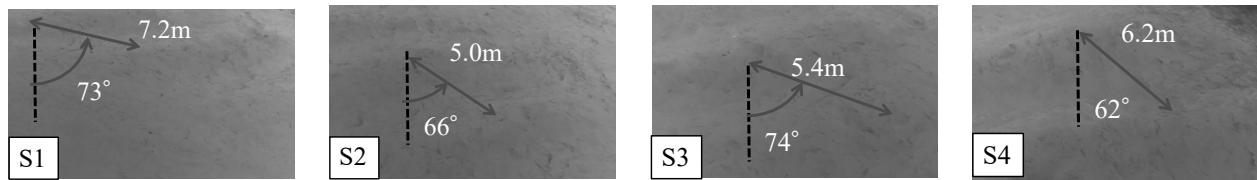


図-6 水位・流量の時系列変化と観測時刻

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

一方, Yalin & Bishop¹³⁾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

(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KU-STIV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であると考え, 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.

(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.

(2) 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て氾濫流量の半分程度であったり, 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 (7) 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

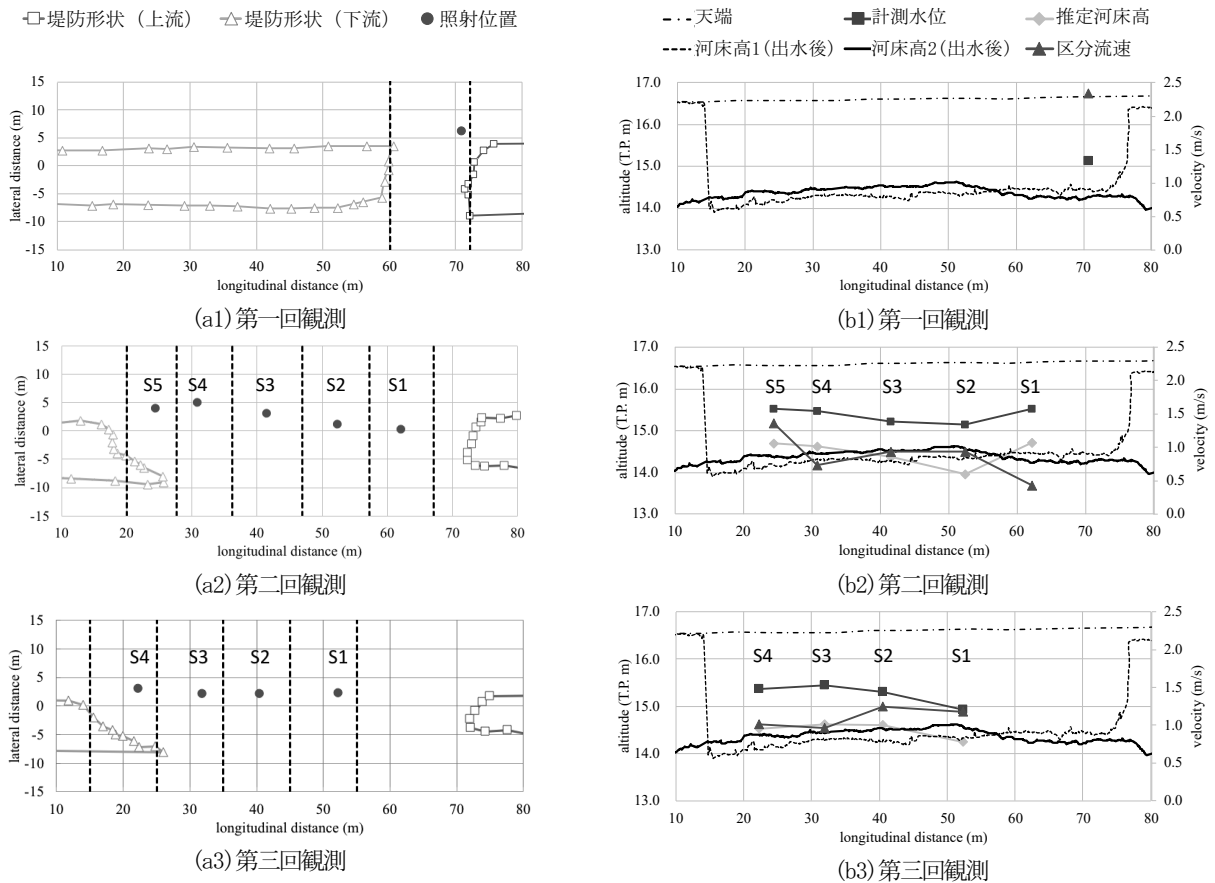


図-7 全観測における堤防形状と照射位置(a#), 計測流速・計測水位・推定河床高

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_{0i} (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			

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。

- (a) 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。

- (b) 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。
- (c) 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。

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 ¹⁴⁾
7	流量値の算定	式(3)

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¹⁴⁾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¹⁵⁾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となることが橋田ら¹¹⁾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。また、UAVの運用において株式会社福田水文センター、有限会社タイプエスより多大なるご尽力を頂いた。流向や波長の計測においてKU-STIV（Be-systems社製）を活用した。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) Fujita, I., Kosaka, Y., Honda, M., Yorozyua, A. and Motonaga, Y. : Day and Night Measurements of Snow Melt Floods by STIV with a Far Infrared Camera, Proceedings of 2013 IAHR Congress, on USB memory, A10458.pdf. 2013
- 4) Yorozyua A., Kanno Y., Fukami K. and Oodaira K. : Development of automatic water discharge measurement system. Environmental

Hydraulics, Christodoulou & Stamou (eds) @ 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-58475-3, pp.839-844. 2010.

- 5) 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
- 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.
- 7) 能登谷祐一，藤田一郎，建口沙彩：三次元検査空間を用いた河川表面流ベクトルの計測手法 STVVの開発，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.73, No.4, I_511-I_516, 2017.
- 8) 佐藤匡，萬矢敦啓，橋場雅弘：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）—，第60回（平成28年度）北海道開発技術研究発表会論文，2017.5
- 9) 萬矢敦啓，埴原学，工藤俊，小関博司，笛田俊治：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.
- 10) 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,
- 11) 橋田隆史，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.
- 12) 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.
- 13) Yalin, M.S. and Bishop, C.T. : On the physical modeling of dunes, Proc. 17th Cong. IAHR, 1. 1977.
- 14) 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.
- 15) 工藤俊，萬矢敦啓，小関博司，笛田俊治，中津川誠：洪水時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.

(2019. 4. 2受付)