

遠赤外線カメラを用いた画像処理型流速測定法 による流速・流量観測について —出水時の連続無人観測に向けて—

網走開発建設部 治水課 ○森岡 洸太郎
網走開発建設部 治水課 大島 省吾
(株) 北開水工コンサルタント 佐々木 章允

近年多発する集中豪雨等による急激な河川水位上昇に伴い、高水流量観測時に浮子投下対象となる橋の水没、周辺道路の冠水、観測員の安全確保、急激な増水による水位上昇期（ピーク）の観測が困難等の問題がある。これらの問題を解決するため、遠赤外線カメラを用いて出水時の映像を画像処理型流速測定法により解析を行った。今後の活用に向けて従来の流量観測による流量と比較し、整合性を検討した結果を報告する。

キーワード：遠赤外線カメラ、画像解析、流量観測、浮子観測

1. はじめに

近年多発する集中豪雨等による急激な河川水位上昇や河川管理施設の能力を上回る洪水の発生頻度が高まるなど、これまで以上に正確に水位・流量を把握することが重要となっている。しかし、従来の浮子観測では、高水流量観測時に浮子投下対象となる橋の水没や周辺道路の冠水、豪雨・暴風雨時の観測下における観測員の安全確保、急激な増水による水位上昇期（ピーク）の観測が困難等の問題がある。

これらの問題を解決するため、常呂川の上川沿観測所において、「超過洪水時での観測継続の確保」、「低水位から高水位まで同一測線での観測」を目的として、夜間も連続して観測可能な遠赤外線カメラで撮影した出水時の映像を画像処理型流速測定法により流速解析し、出水時の流速・流量の算出を行った。

本稿では今後の活用に向けて従来の流量観測による流量と比較し、整合性を検討した結果を報告する。

2. 遠赤外線カメラによる流速・流量観測

(1) 現状の観測方法と課題

対象とした常呂川の下流部に位置する上川沿観測所（KP10.9、図-1）は、右岸が山付き地形であり、左岸側からのみアクセス可能である。道道7号線からアクセスすることになるが、観測所周辺が洪水氾濫により浸水した場合、アクセスや退避が不可能となる危険性がある。

観測所周辺に橋がないため、高水流量観測（浮子観測）は、上流の太幌橋（KP12.7）で行うこととしているが、太幌橋は堤々間に架かっていないため、高水敷冠水後は観測継続が困難となる。高水敷冠水後は下流の常呂大橋（KP1.6）に場所を変え観測を継続するが、基準水位地点との距離が約9kmと遠く、水位・流量に時間差が生じるだけでなく、河口に近い潮位の影響を受け正確な流速・流量が観測できない等の問題がある。

これらの課題を解決するために遠赤外線カメラを用いた流速・流量観測の適用性について現地実証実験を行った。

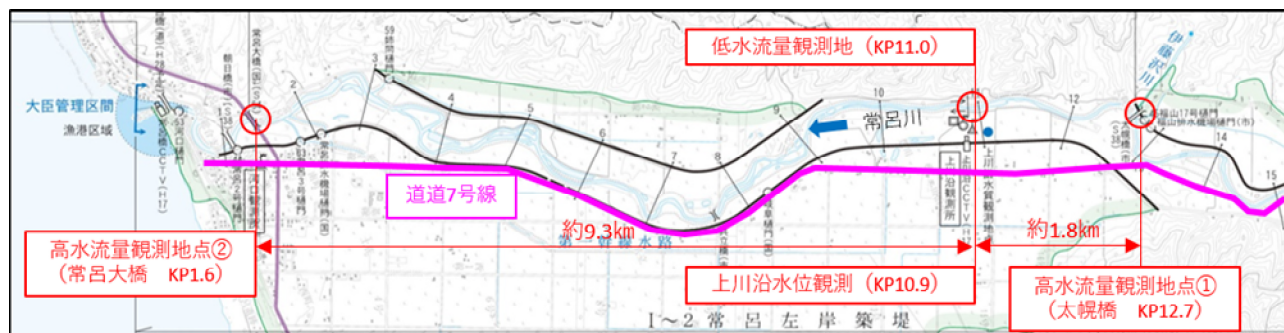


図-1 上川沿観測所の位置関係



写真-1 遠赤外線カメラ (FLIR 社製 FC-Series 0)

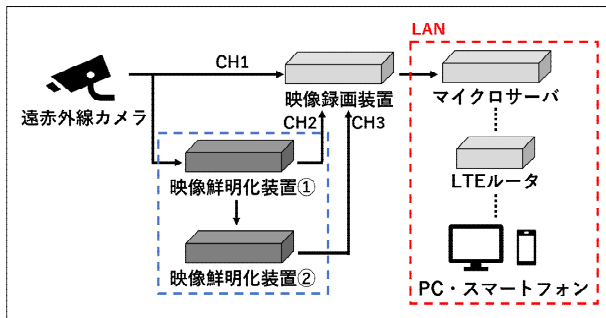


図-2 観測機器の構成

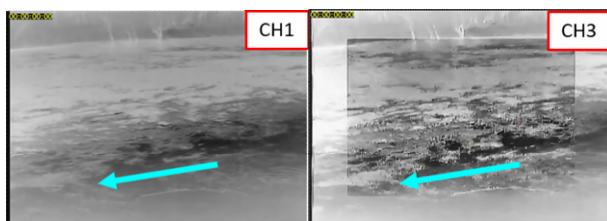


写真-2 低水路用カメラ出水時映像
(左: 鮮明化前、右: 鮮明化後)

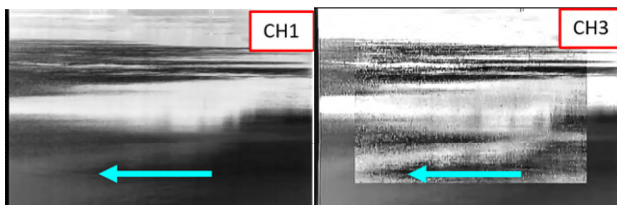


写真-3 高水敷用カメラ出水時映像
(左: 鮮明化前、右: 鮮明化後)

(2) 観測機器の選定

出水時の観測は夜間となる場合があり、夜間の映像も撮影する必要があるため、光源がない暗闇でも撮影可能なFLIR社製の遠赤外線カメラ (FC-Series 0、写真-1) を選定した。

遠赤外線カメラは可視光ではなく、放射エネルギー (反射したものも含む) を可視化しており、逆光や霧の影響を受けにくい等の特徴がある。しかし、気象条件等によっては鮮明な映像が撮影できない場合や水面が鏡面状態になり流速解析が困難となる場合がある。そのため、映像鮮明化装置を用いて撮影した映像を鮮明化し、水面等の視認性を向上させることで流速解析の精度向上を図った (図-2、写真-2、写真-3)。

MORIOKA Koutarou, OOSHIMA Shogo, SASAKI Akiyoshi



写真-4 遠赤外線カメラ設置状況 (低水路用)



写真-5 遠赤外線カメラ設置状況 (高水敷用)

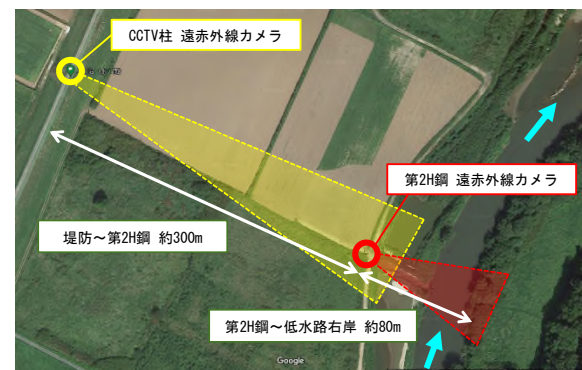


図-3 遠赤外線カメラ設置位置 (平面図)

(3) 機器設置

遠赤外線カメラは、計画規模洪水時の水面幅を網羅するため、主流の低水路用に水位標第2H鋼の上部に1台、左岸高水敷用として左岸堤防上のCCTV柱に1台、計2台設置した (写真-4、写真-5)。流速解析には水位データが必要なため、基準水位測線が映るような画角とし、流速解析精度を確保するため、カメラの俯角が推奨されている2°以上となる高さにカメラを設置した (図-3、図-4)。

また、撮影する水面幅に応じて異なる焦点距離のカメラレンズを選定した (低水路用カメラ: 19mm、高水敷用カメラ: 60mm)。

設置期間は夏期出水期の7月から11月末迄とした。

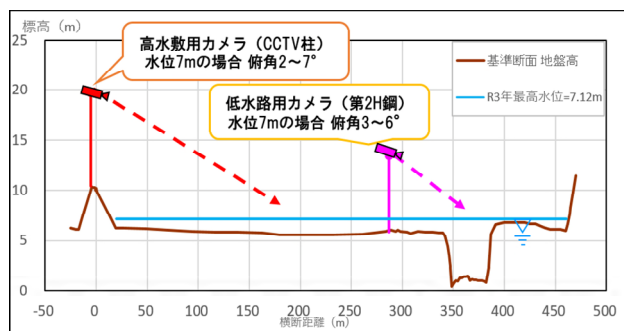
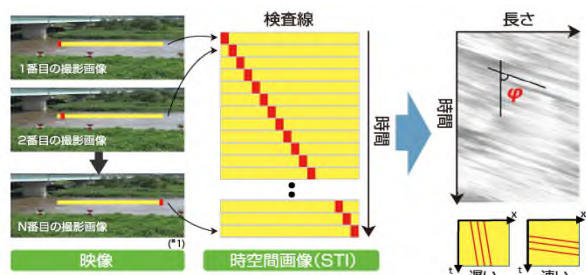


図-4 遠赤外線カメラ設置位置（断面図）



左図：映像から時空間画像（Space-Time Image：STI）を生成
図中の黄色線は検査線、赤四角は表面波紋等の輝度値の特徴を表しています。時空間画像（STI）は検査線上の輝度値を時間方向に並べることによって生成され、流速に応じた輝度分布の縞模様が見えます。

右図：時空間画像（STI）から流速（V）を計算
流速は時空間画像（STI）の縞模様の傾き（ ϕ ）、長さ、および時間から計算されます。右下図は、 ϕ が小さい場合には流れが遅く、 ϕ が大きい場合には流れが速いことを表します。

図-5 STIV法のイメージ

（株）ハイドロ総合技術研究所 HP より）

(4) 流速解析手法

遠赤外線カメラで撮影した映像から流速を求める手法として、河川砂防技術基準（調査編）にも掲載されている画像処理型流速測定法（以下、画像解析）のうち、時空間画像（以下、STI画像）を用いるSTIV法（Space-Time Image Velocimetry）を採用した。映像からの流速解析には、流速・流量計測ソフトウェア『Hydro-STIV』（株）ハイドロ総合技術研究所）を使用した。STIV法は、カメラ映像上の水面に検査線（図-5、黄色線）を配置し、その検査線上の波紋（図-5、黄色線上の赤点）の移動速度を解析することで水表面流速を計測する手法である。動画から得られた連続した静止画を用いて、検査線上の輝度値を時間軸方向に積み重ねたSTI画像（図-5内右図、横軸：長さ、縦軸：時間の次元）に生じる縞パターン（傾き ϕ ）から水表面流速を求める。近年はAI（ディープラーニング）による画像判定技術が導入され、豪雨時や障害物が映り込んだ場合でも精度良く解析が可能である。

(5) 観測準備（標定点設置等）

撮影した映像からSTI画像を作成する際、斜め撮影した映像を垂直撮影の映像へ幾何補正する必要がある。そのため、映像画角内に標定点を設置し、測量座標を与え

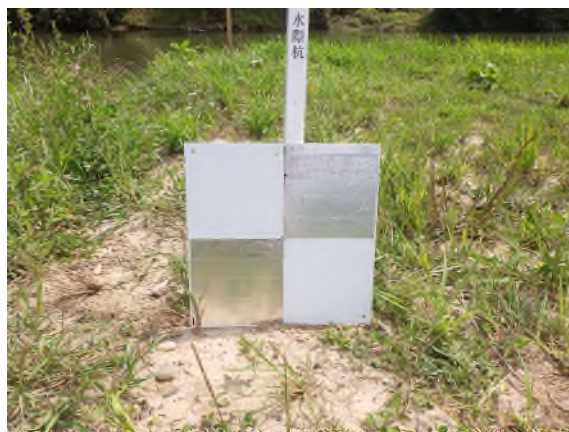


写真-6 標定点（遠赤外線カメラ用）



写真-7 標定点設置状況（高水敷：通常カメラ）



写真-8 標定点設置状況（高水敷：遠赤外線カメラ）

た。遠赤外線カメラは可視光ではなく、放射エネルギー（熱）を可視化するため、通常の木製やプラスチック製の標定点では視認が難しくなる。そのため、ベニヤ板等で作成した標定点にアルミテープを貼り付け、空の放射（低温）を映し、地盤等との温度差を発生させることで標定点の視認性を確保した（写真-6～写真-8）。

また、流量算出には流速解析を行う測線の断面積が必要となるため、出水前後に同測線の横断測量を行い、断面形状を把握した。

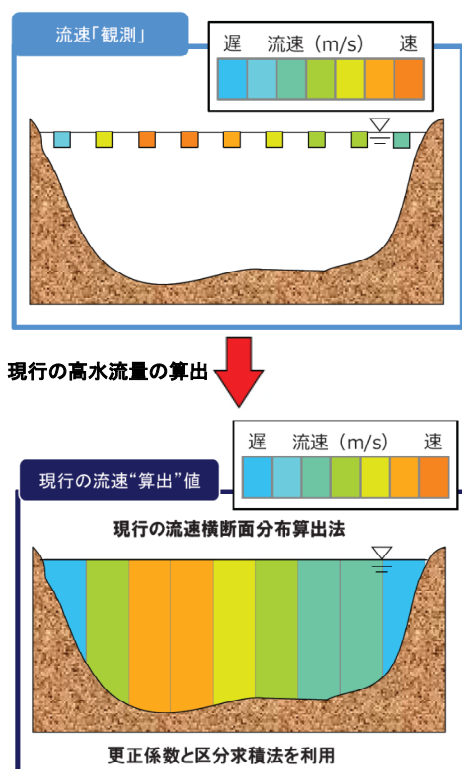


図-6 流量算出イメージ

(流量観測の高度化マニュアル 高水流量観測編より)

(6) 流量算出方法

流量は、浮子観測と同様に「区分（測線毎）流速」に「区分断面積」を乗じて算出する「区分流量」の合算で算出した（図-6）。低水路満杯以上の出水時の総流量は「左岸高水敷～水位標第2H鋼の流量（高水敷用カメラ）」と「水位標第2H鋼～右岸高水敷の流量（低水路用カメラ）」の合算値とした。

ここでの「区分流速」はSTIV法で解析した表面流速に更正係数を乗じた「更正流速」であり、更正係数は、画像解析において一般的に使用され、『非接触型流速計測法の手引き（試行版）H30年2月版』²⁾に記載されている、0.85とした。

3. 従来の流量観測との比較検証

(1) 令和3年、令和4年出水状況

令和3年は11月に氾濫注意水位（6.20m）を超過する出水が発生し、ピーク水位は11月10日19時 7.12m、高水敷が冠水する規模の出水であり、高水敷の水深は0.5～1.0mであった。

令和4年は8月に氾濫注意水位を超過する出水が発生し、ピーク水位は8月17日6時 6.74m、高水敷は部分的に冠水した程度であった。

高水敷が冠水した令和3年11月の映像から低水路と高

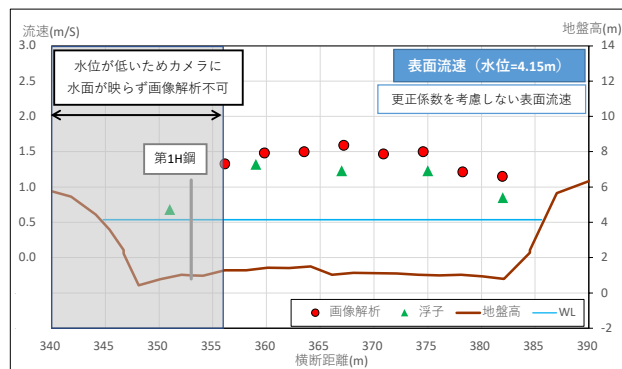


図-7 表面流速の比較（水位 4.15m）

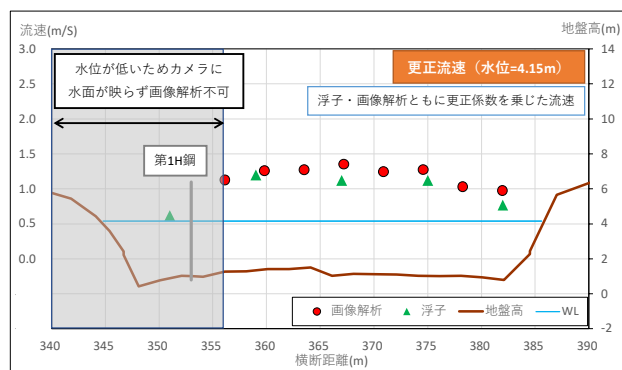


図-8 更正流速の比較（水位 4.15m）

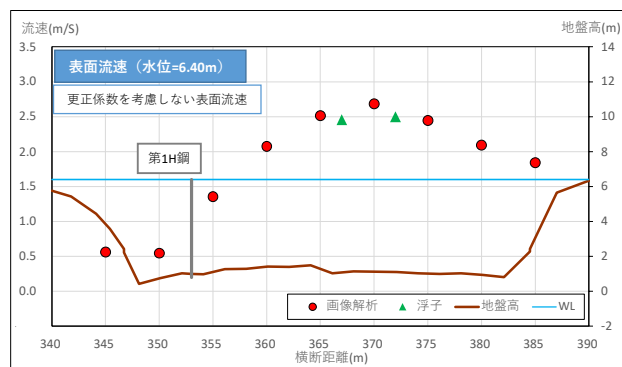


図-9 表面流速の比較（水位 6.40m）

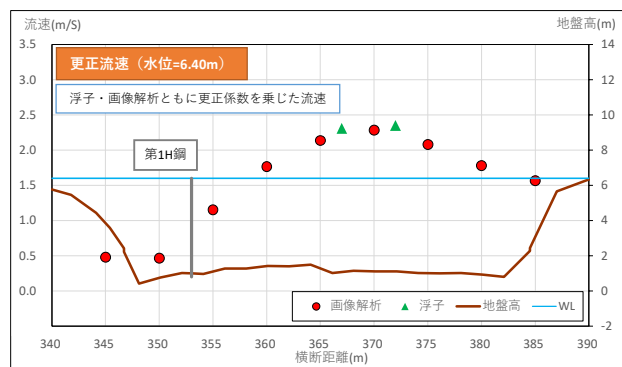


図-10 更正流速の比較（水位 6.40m）

水敷の流速解析、令和4年8月の映像から低水路の流速解析を行い、それぞれ流量算出および従来の流量観測による流量との比較検証を行った。

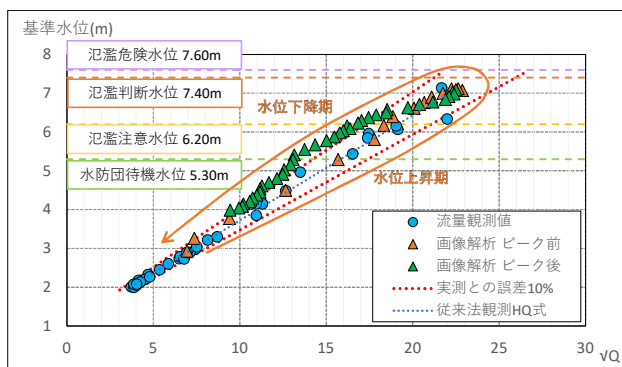


図-11 従来法と画像解析のH- $\sqrt{Q}$ の関係（令和3年）

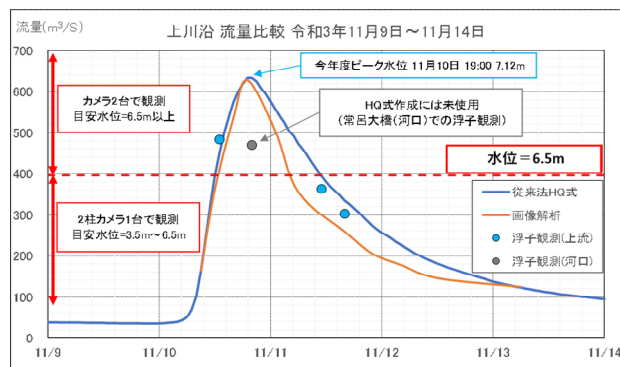


図-13 時系列流量比較（令和3年11月出水）

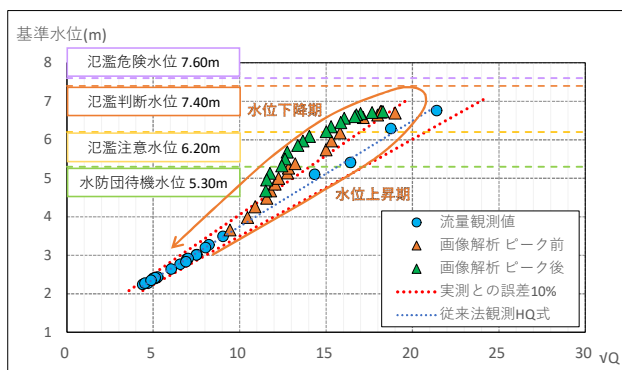


図-12 従来法と画像解析のH- $\sqrt{Q}$ の関係（令和4年）

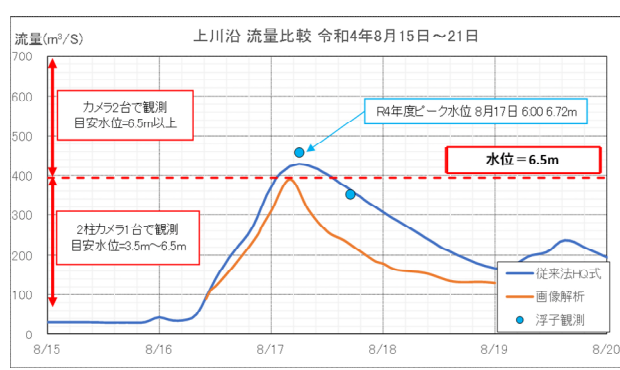


図-14 時系列流量比較（令和4年8月出水）

(2) 低水路内流速比較

画像解析で求めた流速の精度確認のため、令和3年11月出水中の同時刻・同水位の浮子観測の流速と比較を行った。流速比較の浮子観測は画像解析と同じく基準断面で行ったが、浮子投下は川幅が広く河岸からの手投げでの投下が困難なため、上流の太幌橋から浮子を投下した。

浮子の流下時間測定は、水位が低水路満杯以下の場合には基準断面の河岸から目視で行い、水位が低水路満杯以上の場合には遠赤外線カメラに映った浮子の映像から流下時間・流下距離を読み取り、浮子流速を算出した。

また、画像解析流速に適用する更正係数（0.85）の検証のため、画像解析と浮子それぞれの表面流速と、更正係数を適用した更正流速の比較を行った。図-7と図-8は水位4.15m、図-9と図-10は水位6.40mであり、それぞれ同時刻の流速である。水位4.15m、水位6.40m共に表面流速よりも更正係数を適用した更正流速の方が画像解析と浮子観測の流速に差がなく、画像解析の精度に問題がないことを確認した。

(3) 画像解析と従来法観測値のH- $\sqrt{Q}$ の関係

画像解析結果から流量を算出し、「従来法（流速計、浮子）による流量観測値（以下、従来法）」との比較を行った（図-11、図-12）。画像解析流量は出水の水位上昇～ピーク～下降までの2時間おき（ピーク付近は1時間おき）の流量である。

a) 令和3年のH- $\sqrt{Q}$ の関係

令和3年の画像解析流量は、水位下降期の一部を除き従来法による流量の誤差10%以内（赤点線内）の精度で観測されており、高水敷冠水後（水位≒約6.5m以上）も流量がばらつくことなく水位上昇から下降まで観測が継続されている。

水位5～6m付近で従来法と誤差が大きくなる要因としては、画像解析を行う基準断面と浮子観測を行う上流の太幌橋の間で高水敷が冠水し、太幌橋で観測された流量の一部が基準断面まで流下せず、河道内に貯留されたことが考えられる。

一方、浮子観測は水位によって観測地点が変わるため、高水敷冠水後の常呂大橋（KP1.6）での浮子観測は、上川沿観測所の基準水位との時間差発生や時間帯により潮位の影響を受けること等から観測値がばらついている。

従来の浮子観測では一度の出水で、HQ式の妥当性照査項目の「洪水時における水位流量曲線のループの方向」を確認可能な数の観測を行うことが困難だったが、画像解析の連続的な流量算出により、明確な反時計回りのループを確認できた。

b) 令和4年のH- $\sqrt{Q}$ の関係

令和4年の画像解析流量は、水位上昇開始時（水位4m付近）やピーク水位付近では従来法による流量の誤差10%以内（赤点線内）の精度で観測されている。

水位5～6m付近では、令和3年と同様に太幌橋で観測された流量の一部が基準断面まで流下しなかったことが考

えられる。

「洪水時における水位流量曲線のループの方向」は令和3年同様に、画像解析の連続的な流量算出により、明確な反時計回りのループを確認できた。

(4) 出水時流量の時系列比較

令和3年11月、令和4年8月に発生した出水の水位上昇～下降までの画像解析と従来法HQ式（浮子観測）の流量を比較した（図-13、図-14）。

a) 令和3年の流量比較

令和3年11月出水は、水位上昇期～ピーク水位付近までの流量は概ね一致している。ピーク後～水位下降期では従来法HQ式の流量が過大となったが、画像解析（基準水位断面）と浮子観測（太幌橋、常呂大橋）の観測地点が異なるためと考えられる。

b) 令和4年の流量比較

令和4年8月出水は、高水敷が冠水し始める流量 $150\text{m}^3/\text{s}$ （水位約 5.0m ）付近から従来法HQ式の流量が過大となったが、ピーク付近では従来法HQ式と画像解析の流量差は小さくなっている。

高水敷が冠水開始時点で流量差が大きくなる要因としては、浮子観測（太幌橋）と画像解析（基準断面）で観測地点が異なること（太幌橋～基準断面間で河道内貯留）、流速算出の測線数が異なること（浮子観測は4～5測線、画像解析は10測線以上）が考えられる。

4. おわりに

常呂川の上川沿観測所において、低水路用（水位標第2H鋼の上部）と高水敷用（CCTV柱の点検台）の2台の遠赤外線カメラを設置し出水時の映像から、画像処理型流速測定法により、水位上昇～ピーク～下降までの連続観測を行い、流速・流量を算出した。令和3年11月の氾濫注意水位を超過し、高水敷が冠水するような出水時では、低水路から高水敷までの約 400m の川幅で、同一測線で昼夜連続かつ無人で流速・流量を観測することができた。

高水敷が冠水した令和3年11月出水では、出水時の高水敷の水深が $0.5\text{m} \sim 1\text{m}$ の場合でも流速・流量の観測が可能であったことから、氾濫危険水位を超過するような

計画規模の出水でも同一測線で昼夜連続かつ無人で流速・流量を観測することが可能であることを確認した。

画像解析の観測精度を確認するため、浮子観測の流速と比較したところ、それぞれの更正係数を使用した更正流速はほぼ同等の値となり、画像解析は浮子観測と同等の精度で観測できていることを確認した。

流量は高水敷が冠水し始める水位付近（約 5.0m ）では、従来法と画像解析で流量差が発生する場合があるが、水位上昇開始時やピーク付近では概ね一致した。

また、画像解析の連続的な流量算出により、HQ式の妥当性照査項目の「洪水時における水位流量曲線のループの方向」において、明確な反時計回りのループを確認できた。

今後も高水敷以上となる水位での流速・流量の精度確認、超過洪水での観測、更正係数の検証等を継続的にを行い、実用化に向けて課題を抽出し、他の観測所へ展開できるように検討を行う。

参考文献

- 1) 藤田一郎：画像解析法による流量の算出，河川情報取扱技術研修，2020年。
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川計画課 河川情報企画室：非接触型流速計測法の手引き（試行版）＜平成29年度版＞，2018年2月。
- 3) 国土交通省 水管理・国土保全局：河川砂防技術基準（調査編）第2章，2014年4月。
- 4) 国立研究開発法人土木研究所 水工研究グループ 水文チーム：流量観測の高度化マニュアル（高水流量観測編），Ver1.2，2016年6月。
- 5) 藤田一郎、小阪純史、萬矢敦啓、本永良樹：遠赤外線カメラを用いた融雪洪水の昼夜間表面流画像計測，土木学会論文集B1(水工学)，2013年。
- 6) 藤田一郎、霜野充、本田将人、小阪純史、萬矢敦啓、本永良樹：河川流速計測の汎用化に向けたSTIVシステムの精度検証，河川技術論文集，第19巻，2013年6月。
- 7) 小林範之、渡邊明英、野谷靖浩、藤田一郎、能登谷祐一：画像解析を用いた河川流速計測における撮影・標定手法の開発と精度管理に関する研究，河川技術論文集，第23巻，2017年6月。
- 8) 渡辺健、大森嘉郎、藤田一郎、井口真生子、長谷川誠：STIV法による流量観測の不確かさ評価，河川技術論文集，第27巻，2021年6月。