

赤外線カメラを用いたSTIV法による 無人流量観測の有効性

EFFECTIVENESS OF UNMANNED DISCHARGE OBSERVATION BY STIV METHOD USING AN INFRARED CAMERA

橋場雅弘¹・藤田一郎²・太田陽子³・土田宏一¹・甲斐達也¹
Masahiro HASHIBA, Ichiro FUJITA, Yoko OHTA, Koichi TSUCHIDA and Tatsuya KAI

¹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)

The method of Space-Time Image Velocimetry(STIV) can be expected to save labors and promote unmanned discharge measurement. A trail camera with the solar panel was able to be installed without commercial power and it required near-infrared illumination at night-time and effective distance was within around 50-60m. For a far-infrared camera should be combined with an image sharpening device in order to sharpen the water ripples. The effective distance was within around 150m same as visible camera. It could prevent random noise by stabilizing the current with the Uninterruptible Power Supply(UPS). The difference between the observed discharge and image velocimetry discharge was about $\pm 10\%$. As a result, it was possible to use the image velocimetry discharge for the calculation of the water level and discharge rating curve.

Key Words : *Unmanned discharge, STIV, Trail camera, far-infrared camera*

1. はじめに

甚大な水災害が毎年のように発生している。山田ら¹⁾は平均気温が4℃上昇した場合は、計画規模相当の降水量は約1.4倍、ピーク流量は1.5~1.7倍、浸水面積は1.3~1.4倍に増加するとした。災害発生時の雨量、水位、流量の水文データは被災のメカニズム解明や今後の河川計画に最も重要な基礎資料になる。一方で雨量と水位は観測の自動化・自動配信が進んでいるが、流量は未だに観測員の人力によって行われている。近年の局所的集中豪雨や記録的短時間大雨情報が頻発する中、人力の観測では、急激な水位上昇に間に合わない、危険で観測自体が困難でデータが取得できない事態が頻発している。社会情勢をみると、少子高齢化による観測員不足は、将来の観測体制の継続が困難になることを予見させる。加えて、「働き方改革関連法案」によって労働時間が制約され、いつ発生するかわからない災害に対応することが困難になっており、人力による観測に限界がみえている。こうした課題の解決方法として、観測の省力化・無人化が期待できる画像処理による流速測定技術の研究が進んでいる。藤田ら²⁾は流下方向をあらかじめ設定することで解析を容易にし、画像の質にとらわれない実用的な手法としてSpace-Time Image Velocimetry (STIV) 法を開発した。

原ら³⁾は二次元高速フーリエ変換を適用させて時空間画像のノイズ除去と流速勾配の明確化を提案した。また、能登谷ら⁴⁾は波紋の軌跡として時空間画像に現れるパターン勾配を自己相関関数で算出するQESTA (Quality Evaluation of STI by using Two dimensional Autocorrelation function) を開発した。さらに、藤田ら⁵⁾は、波数・周波数解析に基づく特定周波数の抽出フィルタを開発し、時空間画像の質を著しく改善させた。これらは、気象条件によって不安定な画質になりやすい実河川への適用が有効である。しかし、画像処理に関わる技術的な議論は多いが、河川規模や周辺環境への適用性など現地実装に向けた実務的な議論は少ない。実河川での実績として、土田ら⁶⁾は近赤外線トレイルカメラを用いた設置型観測でダム上流部の既往最大流量の観測に成功した。藤田ら⁷⁾は遠赤外線カメラでの表面流速の整合性を検証し、佐々木ら⁸⁾、小森ら⁹⁾、菊地ら¹⁰⁾は、設置型遠赤外線カメラを用いた流量観測システムを検討し、設置型観測の有効性を検証している。

本研究では、既往研究をもとに遠赤外線カメラと近赤外線のトレイルカメラによる無人流量観測システムの現地実証試験を行い、得られた数々の課題や優位性を整理し、実用化に向けた構築方法と将来の流量管理への活用方法を検討した。

2. トレイルカメラによる観測

(1) 使用機材とシステム構成

a) 使用機材

トレイルカメラは昼間は可視、夜間は近赤外線動画を取得することが可能で、主に野生動物の観察等に用いられてきた。今回使用したのは、ハイクカムSP-2（株）ハイク）と近赤外線照明（SE24IR）で、電源はソーラーパネル（20W）からの供給とした。

b) 設置方法

トレイルカメラは、図-1のようにSDカード付きのカメラと電源部（ソーラーパネル等）及び近赤外線照明の単純な構成である。図-2のように単管パイプ組みに機材を取り付けるだけで観測施設が完成する。

c) 観測システム

トレイルカメラはもともと赤外線感知センサーを有しており、画角内に動くものがあると起動する仕組みになっているが、河川計測に使用するには、タイムラプス撮影ができるものを選択する必要がある。動画の記録はSDHC規格のメモ리카ード（32GB）を使用した。720HD画質で動画を保存した場合、おおよそ14日でメモリ容量が一杯になるため、リレー収録（はじめから上書きして継続）で設定しておき、解析対象のイベントデータは少なくとも上書きされる前に回収する保守点検計画を立てておく必要がある。2017年以降は64GB以上のSDXC規格に対応したものが出てきており、観測条件はより効率化していくと推察される。

d) 近赤外線照明

一般的なトレイルカメラには夜間用に近赤外線照明が付属しているが、距離が10m程度の照射距離のため、実河川で使用する場合は、別途近赤外線照明を取り付ける必要がある。図-3(a)のような水面と照明の距離が10m以内で20Wの照明を付けた場合は、図-3(b)のようにハレーションを起こす場合がある。よって、照明のセッティングはカメラや照明から水面までの距離を考慮して照明サイズを選択する必要がある。試行錯誤が必要である。概ね水面との距離が100m程度の場合は、50W程の照明が適していると言われており、水面との距離が10m以内の場合は、近赤外線照明は必要ない。

(2) STIVによる解析結果

図-4は平成29年8月22日に美利河ダム上流の後志利別川上利別観測所で記録した既往最大の出水イベントをとらえた事例である。ダム上流部は山間部のため大雨が降ると林道通行止めになり、水位196.63m以上は観測が不可能だった水位帯である。ここでは、トレイルカメラを設置したが、近傍に商用電源が無いのでソーラーパネルで電源を確保した。画像流量はSTIV法によって表面流速を算出し、基準断面を用いた区分求積法で流量を得た。

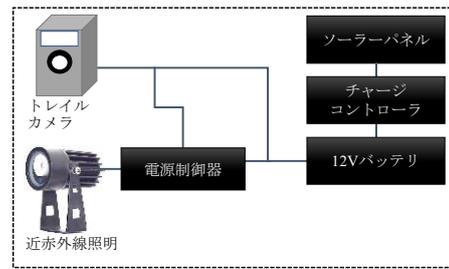


図-1 観測システム系統図

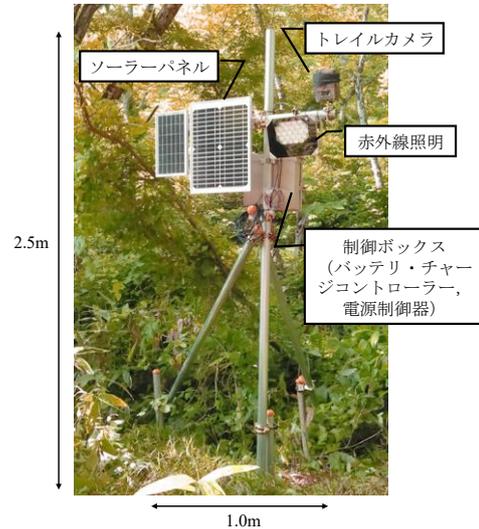


図-2 観測システム外観



図-3 近赤外線照明の失敗事例

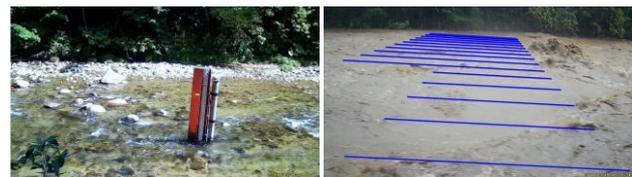


図-4 トレイルカメラの映像（後志利別川上利別）

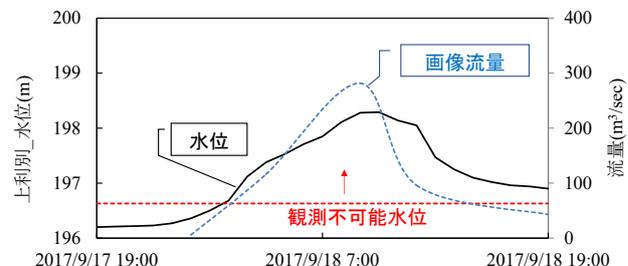


図-5 トレイルカメラでのSTIV流量（後志利別川上利別）

図-5に示すように、出水時の立ち上がりからのハイドロ流量観測を可能とした。

(3) トレイルカメラの優位性

トレイルカメラが最も優位なのは設備コストである。総額でも10万円程度で機材がすべて揃えられる。次に電源環境にロバストであることである。トレイルカメラの消費電力は、昼が1.8W、夜が5.4Wである。乾電池単三を12本格納した場合、10分インターバルで15秒間動画を10日撮り続けることができる。また、ソーラーパネルと蓄電池を設置することで半永久的に稼働する。しかしながら、通信機能など機能拡張は難しいため、機能を限定して使用することが望ましい。

(4) トレイルカメラの留意点

a) 解析可能な川幅

図-5と図-6は、2017年4月27日～28日の融雪出水時に信濃川小千谷観測所において取得したトレイルカメラの昼間と夜間の映像である。カメラは河岸から5m程度に設置している。表-1の横断距離別の流速結果より、昼間はハイビジョン画像が取得できるため解析可能な川幅は120mを超えるが、夜間は近赤外線カメラに切り替わるため、20Wの近赤外線照明(850nm)をつけたとしても、横断距離50～60mが限界であった。昼間の映像は、STIVの精度限界とされる空間解像度が藤田ら¹¹⁾の0.4m/pixelとなる。藤田ら¹¹⁾が示すSTIVの測定限界の俯角が2度程度とすると、約150mが解析可能な距離と推察できる。しかし、昼夜問わず安定した画像を得るにはカメラからの距離50～60m程度がボーダーと推察される。

b) 近距離の場合の留意点

水路など川幅が狭く、カメラと水面の距離が短い場合は単管組で設置できるトレイルカメラは有効である。しかし、画角内の距離が短い場合は、2019年10月4日の厚真川の流入水路で観測した図-7のように、STIV法で得られた輝度分布の時空間画像が水平方向の縞パターンになり、勾配を算出しにくくなる。検査線距離が1mと短いため、流速が速い場合に勾配が水平に近似するのが原因である。観測時間を細かくできれば良いが、動画のフレームレート(30fps)が固定されているため、対策としては想定される最大流速に合わせて、水面からカメラを離し、画角内の流下距離を水面波紋が視認できる範囲で可能な限り広くする必要はある。

c) 劣悪環境での留意点

トレイルカメラについて、昼間の可視カメラでは強雨であっても、レンズに雨粒が付かなければ問題は少ない。しかし、夜間で近赤外線モードになる場合は、図-8のように、降雨や降雪及び霧に近赤外線照明が反射して、水面に照明が当たらないため、水面波紋がとらえにくくなる。また、ノイズが大きくなり解析が困難になる場合がある。これは照明を当てなければ感知できない近赤外線カメラの特性であるため、現時点では有効な対策は無い。

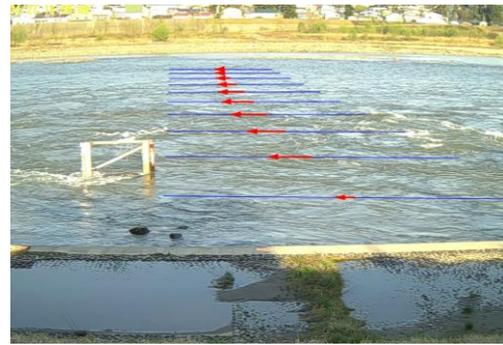


図-5 昼間(可視)の映像(信濃川)

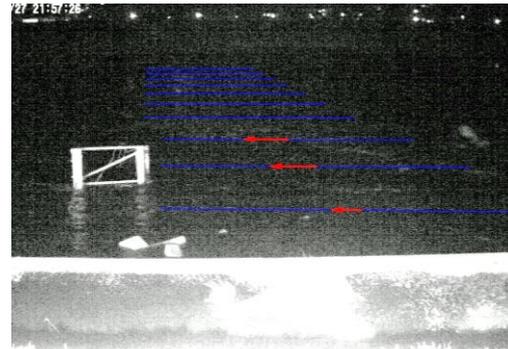


図-6 夜間(近赤外)の映像(信濃川)

表-1 トレイルカメラの流速

距離(m)	単位: m/sec												
	12時	14時	16時	18時	20時	22時	24時	2時	4時	6時	8時	10時	12時
33	0.87	0.60	0.75	0.87	1.00	1.06	0.90	0.36	0.45	0.43	0.78	0.94	0.44
43	2.00	2.39	2.15	2.14	2.19	2.16	1.88	1.44	1.55	1.79	1.72	2.01	1.59
53	2.39	2.38	2.20	2.39	2.32	2.59	2.58	2.09	1.86	2.31	2.32	2.02	1.84
63	2.68	3.05	2.56	2.68	2.60	NG	2.49	NG	2.29	2.45	2.85	2.76	2.60
73	2.59	2.71	2.96	2.69	NG	NG	NG	NG	2.82	2.70	2.85	2.64	2.46
83	2.64	2.64	2.72	2.64	NG	NG	NG	NG	2.06	2.31	2.72	2.45	2.41
93	2.07	2.19	2.23	2.15	NG	NG	NG	NG	1.90	1.96	2.20	2.19	1.94
103	1.66	1.74	1.84	1.53	NG	NG	NG	NG	1.21	1.59	1.81	1.65	1.60
113	1.27	1.35	1.41	1.23	NG	NG	NG	NG	1.02	1.32	1.25	1.12	1.19
123	0.74	0.72	0.94	0.83	NG	NG	NG	NG	NG	0.79	0.84	0.65	0.62

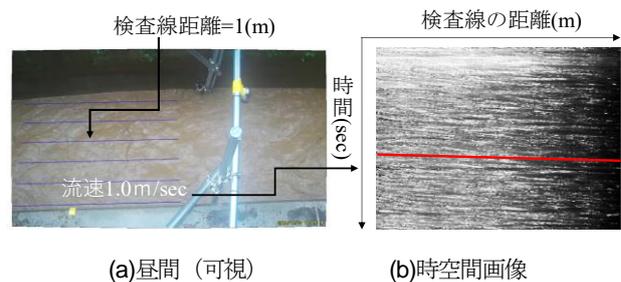


図-7 近距離の映像と時空間画像



図-8 劣悪条件下の映像

3. 遠赤外線カメラによる観測

(1) 使用機材とシステム構成

a) 使用機材

使用したカメラは、遠赤外線カメラFC-632（フリア社）で、19mmレンズを用いた。出力映像解像度は640×480ピクセル、出力映像フレームレートは30fpsとした。レンズサイズは設置位置と水面までの距離から適正な広角、望遠レンズを選定する必要がある。

b) 観測システム

制御システムは図-9に示すように、カメラ映像を記録する映像録画装置1台と、録画映像を任意条件でのインターバル管理や2値化処理機能を有した録画映像管理システムを1台配置した。アナログ映像から水面波紋を明瞭に浮き立たせるために、映像鮮明化装置SV-200（株インフラレッド）2台を直列に接続した。これは、放射エネルギーの差分を増幅して映像化するもので、輝度レベルを変更することで映像を鮮明化するものである。これによって30秒間の映像を10分インターバルでUSB-HDDに保存することとした。

c) 電流の安定化

遠赤外線カメラは原則として商用電源を使用する。観測局舎等に配置している電源は、直流または交流電流を提供しているが、電流の変動が映像ノイズとなってカメラ映像に現れることがある。また、電流の不安定さが原因と推察されるシステム停止が発生したことから、その対策として、耐雷装置（アレスタ）や常時給電方式のインバータを配置して電流の安定化を図った。

d) 遠隔モニタリング

カメラ映像をリアルタイムで確認するためLTE対応のルータを設置し、カメラ映像をスマートフォンやパソコン上で閲覧可能とした。ルータは一般的な汎用品のため、一般公開するような大量アクセスには対応できないが、観測員は離れていても常時、映像の確認が可能である。システムがダウンすると映像が閲覧できなくなることから、システムの稼働状況を確認することが可能である。また、録画映像管理システムを遠隔操作できるため、現地に行かなくても取得データを伝送して、遠隔地で解析作業が可能である。これは災害時で現場に行けないときや、緊急でデータ解析が必要なときなどに有益である。

e) 設置方法

遠赤外線カメラは、図-10に示すように観測局舎の柵内の支柱等に設置可能である。制御装置一式は、観測局舎内に電源供給のコンセントと50cm×40cm×40cm程度のスペースがあれば設置できる。消費電力は500W以下と小さいため、ほとんどの観測局舎で適用可能で、現行の観測計器に影響を及ぼすことはないと評価できる。観測局舎とカメラの設置箇所が離れている場合は、図-11のようにH形鋼に取り付けることが可能である。ここで

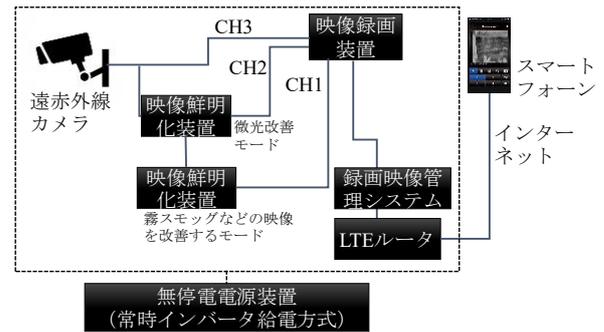


図-9 観測システム系統図



図-10 局舎_観測システム外観（幾春別川藤松）

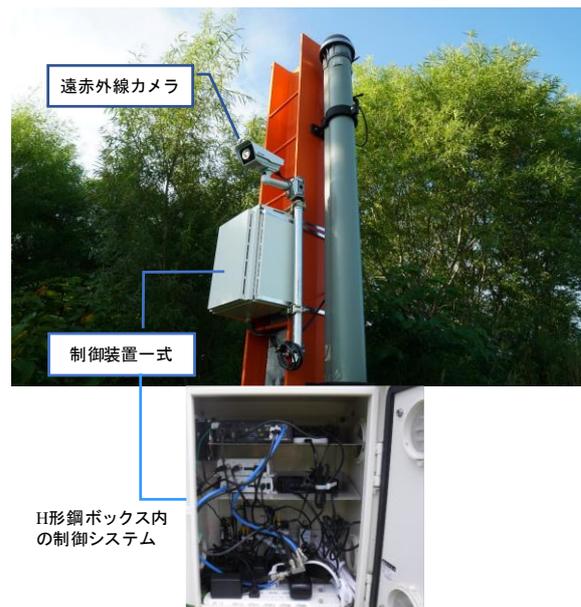


図-11 H形鋼_観測システム外観（雨竜川千秋）

は屋外格納箱（55cm×50cm×30cm）を取り付け、その中に制御装置を全て収めている。電源は水位計用の電源をプルボックスから分配して使用している。遠赤外線水面波紋を感知するには、俯角を小さくした方が波紋による放射エネルギーの差分を得やすい。したがって、河川監視用のCCTVカメラのように高く設置する必要がなく、人力で作業可能である。また、制御装置一式は省スペースで機材が設置できるため、現場に応じた柔軟な対応が可能である。

(2) STIVIによる解析結果

a) 映像鮮明化装置の活用

図-12は、2017年9月30日0時の同時刻の幾春別川藤松観測所の画像である。(a)は遠赤外線カメラのアナログ映像に映像鮮明化装置を直列に接続して、微光改善モードと霧スモッグなどの映像を改善するモードを加えた画像で、良好に水面波紋が視認できている。(b)は映像鮮明化装置1台で、(c)は遠赤外線カメラの生映像である。水面が白く周辺が黒く見えているのは、水温が陸上よりも高いため、北方圏の河川ではよく見られる現象である。(d)は近赤外線カメラの画像だが、近赤外線照明が河川まで届かないため、水面波紋の視認は困難であった。映像鮮明化装置は水面波紋の差分を拡張できるため、遠赤外線カメラを用いる場合には有効な組み合わせである。

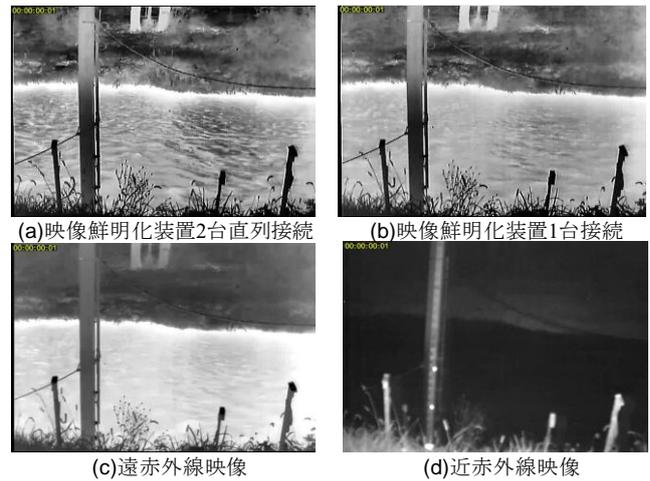


図-12 遠赤外線+映像鮮明化装置の画像

(3) 遠赤外線カメラの優位性

図-13に2019年8月31日に幾春別川藤松観測所で1時間に100mm程度の短時間強雨が降った時の水位と遠赤外線カメラでとらえた画像流量の時系列変化を示す。観測流量は浮子測法で、基準断面より20~50m程度上流の第一と第二の平均断面の区分求積法で得た。画像流量はSTIV法で得た流速に更生係数(表面浮子0.85)を乗じて基準断面での区分求積法で得た。流量の算出条件は異なるが、河道は直線的で川幅や横断形の違いは無かった。画像流量は急激な水位変動に連動した流量変化が得られており、ピーク時8月31日18時の観測流量111.60m³/secに対し、画像流量は110.27 m³/secと、その差は1%であった。水位が低下する9月1日以降はややばらつきがみられるが、高水位では観測流量との整合が確認できた。

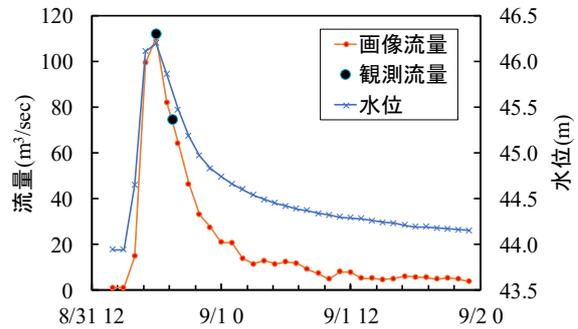


図-13 出水ハイドロ (幾春別川藤松)

(4) 遠赤外線カメラの留意点

a) 解析可能な川幅

遠赤外線カメラでは、トレイルカメラの昼間と同様にSTIVの精度限界とされる空間解像度が目安となる。俯角は大きいほど遠方の空間解像度を確保できるが、遠赤外線カメラは水面波紋の放射エネルギーの差分を映像化するため、俯角は可能な限り小さい方が有利である。

b) 劣悪環境での留意点

図-14は、幾春別川藤松の時間雨量100mmの時の画像である。遠赤外線カメラは雨の放射エネルギーを拾うためぼやけた画像になるが、近赤外線のような雨粒ノイズは発生しない。ここでは、時空間画像を明瞭にするために、二次元高速フーリエ変換 (FFT) による処理を行った³⁾。これにより抽出された特定の周波数帯は、水面波紋の動きのみに対応するものと仮定して適用した。

c) 風による影響の留意点

既往研究¹²⁾では、水表面流速が受ける風の影響は、風向風速計データを用いて除去する必要性が示されており、今後さらなる事例の収集が望まれている。また、図-15(a)のように風による表面張力波が水面に発生した場合、

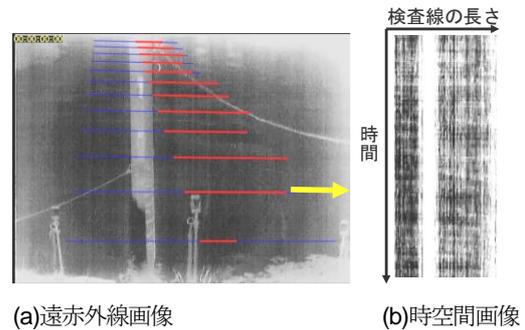


図-14 豪雨時の解析 (幾春別川藤松)

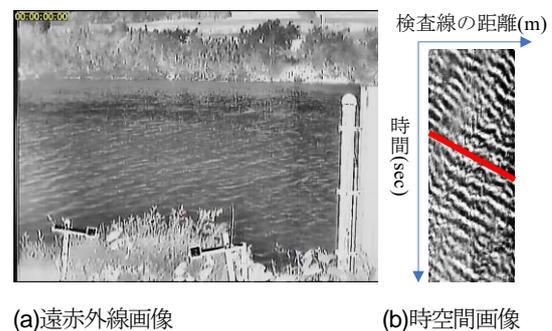


図-15 表面張力波による画像 (雨竜川千秋)

合、時空間画像は波を輝度の移動ととらえるため、図-15(b)のように一見流速と誤認する縞パターンが発生する。しかし、これは風による表面張力波であり、河川の表面流速ではない。このような場合、誤認をしないために、風向風速と映像を確認する必要がある。

4. 水文資料への適用

観測流量と画像流量は3章(3)の方法で算出し、**図-16**に示すように、いずれも±10%以内の差で一致した。次に、画像流量を適用した $H-\sqrt{Q}$ 図を**図-17**と**図-18**に示す。画像流量は多少のばらつきがあるが、水位と一義的な傾向を示し、特に観測が難しい中水位から高水位の流量が画像流量で補填されている。**図-18**の雨竜川千秋では、上流に橋が無いため高水流量観測が困難であったが、画像を加えた水位流量曲線は合流点の背水影響を再現できており、水文資料の精度向上に直結すると評価できる。

5. 結論

- ・ トレイルカメラ、遠赤外線カメラともにシステムは設置作業が簡易的で、既存施設に取付が可能。
- ・ トレイルカメラは商用電源の無い環境でもソーラーパネルで観測可能だが、夜間に近赤外線照明が必要になり、距離50~60m程度が限界であった。
- ・ 遠赤外線カメラは距離150m程度まで解析可能で、映像鮮明化装置を組み合わせることで水表面波紋を明瞭化できる。
- ・ 遠赤外線カメラの画像流量は、現行法の観測流量との差が±10%程度で高水ほど安定する。
- ・ 画像流量は水位流量曲線式の算出に向けて現行法の補填として使用可能である。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部及び函館開発建設部には貴重なデータを頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山田朋人・星野剛・舛屋繁和・植村郁彦・吉田隆年・大村宣明・山本太郎・千葉学・戸村翔・時岡真治・佐々木博文・濱田悠貴・中津川誠：北海道における気候変動に伴う洪水リスクの変化，河川技術論文集，第24巻，2018。
- 2) 藤田一郎・椿涼太：時空間画像を利用した河川表面波紋の移流速度計測、河川技術論文集，第9巻，pp.55~60、2003。
- 3) 原浩気・藤田一郎：時空間画像を用いた河川表面流解析における二次元高速フーリエ変換の適用，水工学論文集，第54巻，2010。
- 4) 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。
- 5) 藤田一郎・柴野達至・谷昂二郎：悪条件下で撮影されたビデオ画像に対するSTIV解析の高性能化，土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.5, I_619-I_624, 2018。
- 6) 土田宏一・藤田一郎・芳賀聖一・亀岡雅史・河上将尊：

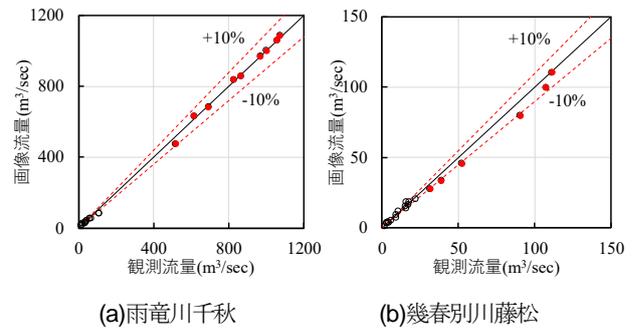


図-16 流量精度検証

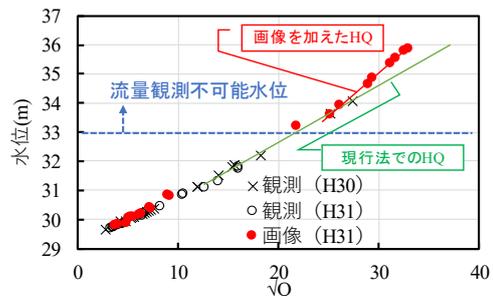


図-17 水位流量 $H-\sqrt{Q}$ 図(雨竜川千秋)

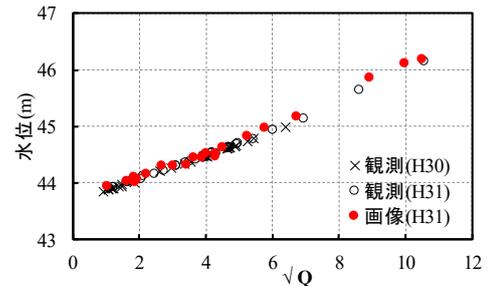


図-18 水位流量 $H-\sqrt{Q}$ 図(幾春別川藤松)

STIV法とトレイルカメラによる低コスト流速観測手法，河川技術論文集，第23巻，2017。

- 7) 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)，Vol.69, No.4, I_703-I_708, 2013。
- 8) 佐々木靖博・佐藤匡・平垣貴俊：画像処理型流量観測の適用性検討—大規模出水に対応した流量観測高度化(その3)—，第61回北海道開発技術研究発表会，2017。
- 9) 小森太一・高橋賢司・梅川正寛：次世代型流量観測システムの構築に向けて—天塩川茨内水位観測所での取り組み—，第62回北海道開発局技術研究発表会，2018。
- 10) 菊地亮介・太田陽子・橋場雅弘：遠赤外線カメラを活用した流量観測システムの有効性，第63回北海道開発技術研究発表会，2019。
- 11) 藤田一郎・北田真規：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，水工学論文集，第58巻，I-613-I-618，2014。
- 12) 恩田実之留・平川隆一：非接触型流速計測法の流速計測精度が受ける風の影響，土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, I_901-I_906, 2016。

(2020. 4. 2受付)